

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний

(повна назва факультету)

Приладобудування

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.051003 Приладобудування

на тему: Висотомір приладового прецизійного автоматизованого комплексу

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ПІ - 51_____

(шифр групи)

Бондаренко Вадим Сергійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Безвесільна О.М. д.т.н, проф. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант технологічний Антонюк Віктор Степанович _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент д.т.н, проф. Шевченко Вадим Володимирович _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Висотомір приладового прецизійного автоматизованого
комплексу

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Приладобудування
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.051003 Приладобудування
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Бондаренко Вадиму Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: «Висотомір приладового прецизійного автоматизованого комплексу» _____

керівник проекту Безвесільна О.М. д.т.н, проф. _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «27» травня 2019р. № 1384-с _____

2. Термін подання студентом проекту 13.06.2019 р _____

3. Вихідні дані до проекту: діапазон виміру висоти 0...500 м, швидкість польоту літака 300 км/год, радіус мембрани 25 мм, припустима абсолютна похибка виміру висоти ± 1.5 м, діапазон зміни температури -50...+60°C, поле літака на висоті 3000 м. _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): огляд і аналіз аналогів об'єкта проектування, проектно – конструкторський розділ. Математична модель висотоміра, дослідження статичної та динамічної характеристик, розрахунок основних елементів конструкції, його точності. Технологічний розділ. _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) кінематична та блок-схема, графіки характеристик, складальне креслення приладу, складальне креслення пристосування. _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	Антонюк В. С. , д.т.н, професор		

7. Дата видачі завдання 15 травня 2019р. _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд і аналіз аналогів проектування	15 травня 2019 р	
2	Опис роботи приладу	18 травня 2019 р	
3	Розрахунок основних елементів конструкції	25 травня 2019 р	
4	Розробка математичної моделі	28 травня 2019 р	
5	Кінематична і блок – схема приладу	1 червня 2019 р	
6	Графіки характеристик	3 червня 2019 р	
7	Складальне креслення пристосування	5 червня 2019 р	
8	Складальне креслення	8 червня 2019 р	
9	Висновки	10 червня 2019 р	

Студент

_____ (підпис)

Бондаренко В. С.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

Безвесільна О.М.

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

Виконав:
студент IV курсу ПБФ гр. ПІ-51
Бондаренко В.С

Керівник ДПБ: д.т.н. , проф. Безвесільна О.М.

АНОТАЦІЯ

У дипломному проекті розроблено конструкцію та досліджено питання точності аерогравіметричного висотоміра.

Графічну частину представлено на 4 аркушах А1: кінематична і блок-схеми аерогравіметричного висотоміра, графіки характеристик, складальне креслення приладу, складальне креслення пристосування.

Пояснювальна записка включає:

- Технічне завдання.
- Огляд і аналіз існуючих методів вимірювань висоти.
- Проектно-конструкторський розділ, де складено математичну модель аерогравіметричного висотоміра, проведено дослідження статичної, динамічної і частотних характеристик, проведено розрахунки основних елементів конструкції приладу, його точності, розглянуто особливості поєднання аерогравіметричного висотоміра з бортовою ПЕОМ.
- Додатки: специфікації складальних креслень.
- Висновки і список літератури.

Completed:
student IV course PBF gr. PI-51
Bondarenko V.S.

Head of the DPB: Dr.Sc. , prof. Bezvesilna O.M.

Summary

In the given degree project the developed design documentation on hithmeter. The graphic part is submitted on 4 sheets A1: kinematic and block schemes of hithmeter, diagrams of the characteristics, assembly drawing of the device and assembly drawing fixture.

The explanatory slip includes:

- a technical task;
- the review and analysis of existing methods of measurement of height;
- design section, where the made mathematical model, the researches static, dynamic and frequency of the characteristics are carried out(spent), the accounts of basic elements of a design of the device, his(its) accuracy, considered features of interface hithmeter from the onboard COMPUTER are carried out(spent);
- the appendix: specifications of the assembly drawings;
- the conclusion and list of the used literature.

Зміст

Вступ	3
1. Технічні вимоги	4
2. Огляд і аналіз аналогів об'єкта проектування	5
3. Проектно-конструкторський розділ	15
3.1. Вивід барометричної формули	15
3.2. Конструкція і опис роботи аерогравіметричного висотоміра	18
3.3. Розрахунок основних елементів конструкції	19
3.3.1. Розрахунок анероїдної коробки	19
3.3.2. Кінематичний розрахунок механізму	22
3.3.3. Розрахунок зубчатого зачеплення	24
3.3.4. Розрахунок спіральної пружини	26
3.3.5. Розрахунок підшипників ковзання	29
3.3.6. Розрахунок термобіметалічного компенсатора 1-го роду	30
3.3.7. Розрахунок термобіметалічного компенсатора 2-го роду	33
3.3.8. Розрахунок потенціометра	34
3.4. Розробка математичної моделі висотоміра	36
3.4.1. Структурна схема висотоміра й аналіз статичної характеристики	36
3.4.2. Розрахунок динамічної характеристики приладу	38
3.4.3. Аналіз динамічної характеристики	44
3.4.4. Аналіз частотних характеристик	45
3.5. Розрахунок похибок приладу	47
3.5.1. Розрахунок методичних похибок	47
3.5.2. Розрахунок інструментальних похибок	49
3.5.3. Визначення сумарної динамічної похибки приладу	55
3.6. Розробка мікропроцесорної системи	58
4. Технологічний розділ	67
4.1. Опис об'єкта для технологічного процесу	67
4.2. Оцінка рівня технологічності конструкції приладу	67
4.2.1. Визначення основних показників технологічності	68
4.2.2. Технічні показники уніфікації конструкції	69
4.2.3. Комплексний показник технологічності виробу	70

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Бондаренко			Висотомір приладового прецизійного автоматизованого комплексу Пояснювальна записка	Літ.	Арк.
Перевір.		Безвесільна					
Реценз.						ПБФ, КПІ	
Н. Контр.							
Затверд.		Безвесільна					

4.3. Розрахунок точності зборки	71
4.4. Розробка технологічного процесу зборки	73
4.5. Схема складального складу	73
4.6. Технологічна схема зборки	74
4.7. Маршрутний технологічний процес	74
4.8. Опис конструкції і принципу роботи технологічного контрольного пристосування	75
Висновки	78
Література	79
Додатки	81

Вступ

Сучасний етап розвитку авіаційного приладобудування характеризується появою новітніх приладів, широким застосуванням компенсаційних методів вимірювання, подальшим розвитком теорії похибок, а також упровадженням методів підвищення вірогідності інформації шляхом резервування і взаємного контролю.

Режими польоту літального пристрою задаються сукупністю великого числа параметрів. Ці параметри в процесі польоту безупинно змінюються як унаслідок впливу на літальний апарат збурювань, так і внаслідок реалізації заданої програми польоту. Для здійснення керованого польоту необхідно забезпечити безупинний вимір зазначених параметрів, для чого і служать авіаційні прилади, у т.ч. і висотоміри.

Основними показниками ефективності і якості авіаційних приладів є висока точність і надійність у складних експлуатаційних умовах, малі габарити і маса, а також невисока вартість при серійному виготовленні. Для поліпшення цих показників необхідно вести розробку авіаційних приладів на сучасному науково-технічному рівні.

В даний час інтерес до дослідження гравітаційного поля Землі зріс у зв'язку з розвитком загальної і розвідницької геодезії, ракетної техніки і необхідністю визначення характеристик гравітаційного поля, головним чином у маловивчених районах.

При авіаційних аерогравіметричних вимірах необхідно забезпечити тривалість виміру висоти над будь-якою, навіть важкодоступною місцевістю.

Даний дипломний проект і розглядає можливість створення аерогравіметричного висотоміра, що дозволяє вимірювати висоту з заданою високою точністю протягом тривалого часу. Тому що характеристики атмосфери не залишаються постійними і змінюються в залежності від часу року і доби, широти місця, метеорологічних умов, сонячної активності й ін., тому розроблювальний нами прилад також повинен забезпечувати захист від цих змін, чи хоча б зводити ці впливи до мінімуму. Це також стосується і різних механічних впливів (короткочасних і тривалих перевантажень, поганої збалансованості вузлів і деталей і особливо вібрацій) і інших факторів, таких як магнітні й електричні поля, радіаційні випромінювання і т.д.

Розробці приладу для вимірювань висоти в авіаційних гравіметричних системах на основі барометричного методу вимірювань висоти і присвячений даний ДПБ.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		3

1. Технічні вимоги

Аерографіметричний висотомір призначений для точного виміру висоти щодо рівня з відомим атмосферним тиском.

Основне його застосування при авіаційних гравіметричних вимірах. До нього пред'являються такі технічні вимоги:

- діапазон виміру висоти 0...500 м;
- припустима абсолютна похибка виміру висоти ± 1.5 м;
- діапазон зміни температури $-50...+60^{\circ}\text{C}$;
- імовірність безвідмовної роботи 2000 годин
- час заспокоєння рухомої системи
- радіус мембрани 25 мм;
- поле літака на висоті 3000 м;
- швидкість польоту літака 300 км/год.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		4

2. ОГЛЯД І АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТА ПРОЕКТУВАННЯ

Прилади, призначені для виміру висоти польоту літака над земною поверхнею, називаються висотомірами [6].

При польотах літаків виділяють абсолютну, відносну, дійсну і барометричну висоти:

- абсолютна висота відраховується від рівня моря;
- відносна висота відраховується від обраного вами рівня, наприклад, від місця чи злету посадки;
- дійсна висота відраховується від того місця, над яким знаходиться літальний апарат у даний момент часу;
- барометрична висота відраховується від місця з заданим атмосферним тиском.

Відомо декілька методів виміру висоти польоту. Розглянемо такі методи: барометричний, радіохвильовий, акустичний, оптичний і інерційний. Один з них, а конкретно – барометричний, ми і використаємо для реалізації поставленої в проекті задачі.

Барометричний метод виміру висоти польоту заснований на залежності атмосферного тиску від висоти (тиск повітря на будь-якому рівні визначається вагою стовпа повітря, розташованого вище цього рівня). Шляхом статичної обробки результатів багаторічних метеорологічних спостережень встановлена середньостатистична залежність: [7-9]

$$\rho = f(H), \quad (2.1)$$

прийнята в якості міжнародної стандартної атмосфери і використана при градуїровці барометричних висотомірів.

Барометричний висотомір вимірює барометричну висоту польоту, тобто висоту щодо деякого рівня, тиск повітря на який відомий. Більш докладно цей метод розглядається при безпосередньому проектуванні нашого приладу.[6]

Радіохвильовий метод вимірювання висоти польоту заснований на відображенні радіохвиль від земної поверхні. Пристрої, побудовані на цьому принципі, вимірюють дійсну висоту польоту і називаються радіовисотомірами.

Розрізняють радіовисотоміри безупинної й імпульсної дії (рис.2.1 і рис.2.2) [6-9].

Блок-схема радіовисотоміра безупинної дії приведена на рис.2.1. Антена А1 радіопередавача, встановленого на літаку, безупинно випромінює електромагнітні хвилі, що, відбиваючись від земної поверхні, повертаються до літака (рис.2.3). Антена А2 радіоприймача, також

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		5

знаходиться на літаку, приймає як випромінювані антеною A_1 , так і відбиті від Землі радіохвилі.

Особливістю радіовисотомірів безупинного випромінювання є частотна модуляція випромінюваних коливань.

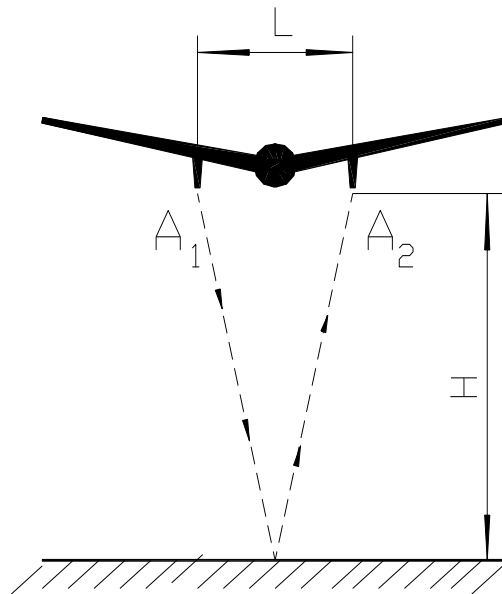


Рис. 2.3. Схема проходження прямих і відбитих радіохвиль [7-9].

На рис.2.4 приведений графік зміни в часі частоти f_1 випромінюваних коливань (суцільна лінія) і частоти f_2 відбитих коливань (пунктирна лінія).

Лінія частот f_2 зрушена убік відставання по відношенню до лінії частот f_1 на величину τ внаслідок того, що в кожен момент часу частота відбитого сигналу відрізняється від частоти прямого сигналу на величину, рівну зміні частоти прямого випромінювання за час τ проходження радіохвиль від літака до Землі і назад.

Різниця частот

$$F = f_1 - f_2, \quad (2.2)$$

виділена в детекторі низької частоти і вимірювана частотоміром, служить мірою щирої висоти польоту.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		6

Для визначення залежності F від H запишемо рівняння відрізків ламаних ліній, що характеризують закон виміру частот f_1 і f_2 (див. рис.2.4):

$$f_1 = f_0 \cdot (1 \pm a \cdot \tau), \quad (2.3)$$

$$f_2 = f_0 \cdot (1 \pm a \cdot (t - \tau)). \quad (2.4)$$

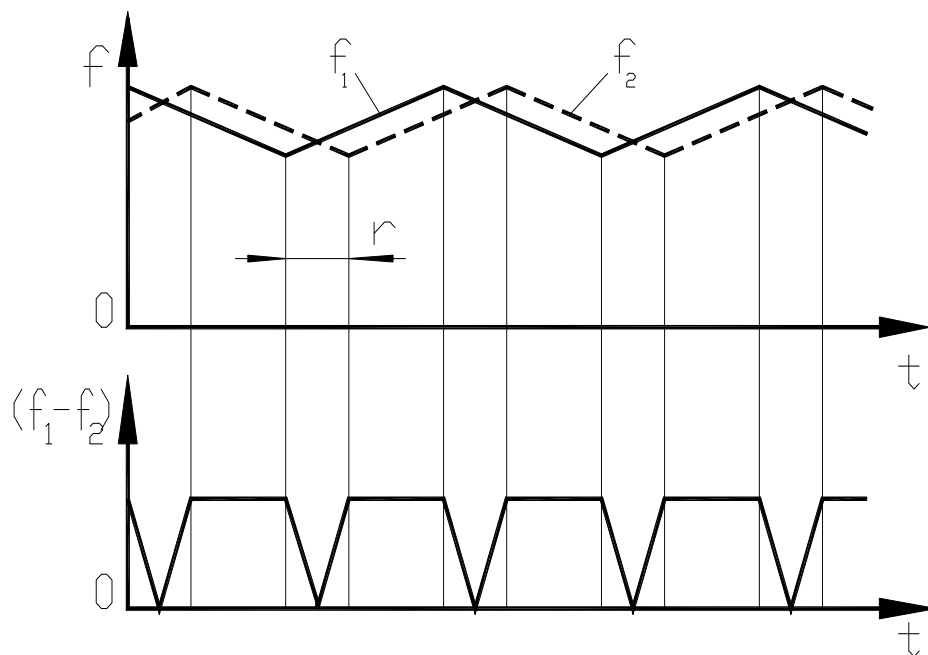


Рис. 2.4. Графік зміни частоти коливань у радіовисотомірі безупинної дії [6].

Різниця частот

$$F = f_1 - f_2 = f_0 \cdot a \cdot \tau = f_0 \cdot a \cdot \left(\frac{2H - l}{c} \right), \quad (2.5)$$

де l – відстань між передавальною і приймальною антеною;

H – дійсна висота польоту;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення радіохвиль.

Оскільки $H \gg l$, то ми можемо знехтувати в чисельнику l у порівнянні з $2H$, і тоді

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		7

$$F = \frac{2f_0 \cdot a}{c} \cdot H = S \cdot H, \quad (2.6)$$

де $S = \frac{2f_0 \cdot a}{c}$ – чутливість радіовисотоміра безупинного випромінювання.

Чутливість росте при більшому середньому значенні частоти f_0 і також більшим стає коефіцієнт a , що характеризує глибину модуляції частоти.

Величина середнього значення частоти дорівнює $f_0 = 400 \dots 600$ МГц, а амплітуда зміни частоти дорівнює $\pm 0.5\%$ від середнього значення при діапазоні вимірюваних висот від 0 до 1500 м.

При посадці літака прилад переключається на малий діапазон (від 0 до 150 м), при цьому амплітуда модуляції частоти збільшується в 10 разів – до $\pm 5\%$ від середнього значення частоти.

Основні похибки радіовисотоміра безупинної дії такі:

- похибки від перешкод приймально-передаючого радіотракту, що спотворює прийнятий сигнал;
- похибки від нестабільності параметрів f_0 і a , що викликають зміну чутливості S , а отже, і масштабу виміру.

При збільшенні висоти польоту потужність відбиваного сигналу різко падає і він стає важко помітним на фоні радіоперешкод.

Інтенсивність корисного сигналу можна збільшити за рахунок підвищення потужності радіопередавача, однак його споживча потужність збільшується пропорційно до 4-го ступеня збільшення висоти.

Вимір великих висот польоту здійснюється радіовисотоміром імпульсної дії, що працює як радіолокатор. Радіовисотомір (див. рис.2.2) містить приймач і передавач, причому випромінювання радіохвиль виробляється не безупинно, а дискретно (імпульсами), розділених значно більш тривалими паузами (рис.2.5).

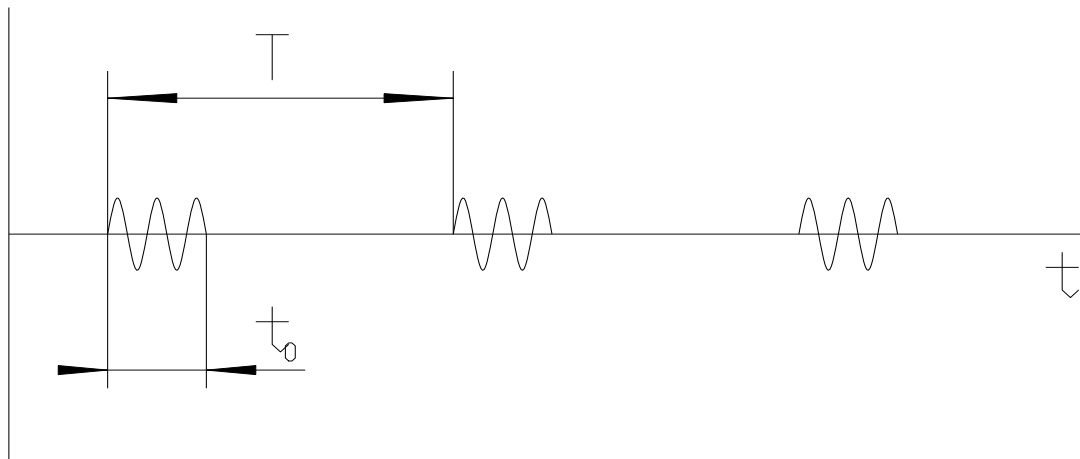


Рис. 2.5. Імпульси високочастотних коливань [7-9].

Співвідношення між миттєвою потужністю $P_{имп}$, випромінюваної в просторі в імпульсі і середній потужності $P_{сер}$ передавача дорівнює

$$\frac{P_{имп}}{P_{сер}} = \frac{T}{\tau_0}, \quad (2.7)$$

де

T - період між імпульсами;

τ_0 - тривалість імпульсу.

Процес виміру висоти радіовисотоміром імпульсної дії зводиться до наступного. Приймна антена приймає два послідовних імпульси – прямої й відбитий від Землі. Обидва імпульси підсилюються і подаються на катодно-променеву трубку, де впливають на електронний промінь із круговим розгорненням.[6]

Якщо рух проміння до окружності від нульової точки шкали буде починатися в момент часу приходу прямого імпульсу, а під час приходу відбитого імпульсу електронний промінь одержить радіальний сплеск, то кутове положення α цього сплеску буде пропорційним вимірюваній висоті:

$$\alpha = \Omega \cdot \tau = \Omega \cdot \left(\frac{2H - l}{c} \right) \cong \frac{2\Omega}{c} \cdot H = S \cdot H, \quad (2.8)$$

де $S = \frac{2\Omega}{c}$ – чутливість приладу;

Ω – кутова швидкість розгорнення електронного променя.

Чутливість S і відповідно точність відліку показань можна збільшити шляхом збільшення швидкості розгорнення Ω . Однак при занадто великій швидкості промінь може зробити кілька оборотів до моменту приходу відбитого імпульсу і виникне невизначеність показань, зв'язана з незнанням кількості оборотів, зроблених променем [6].

Похибки радіовисотомірів імпульсної дії складаються з похибок від радіоперешкод і похибок від мінливості кутової швидкості розгорнення.

Радіовисотомір імпульсного випромінювання не придатний для відліку дуже малих висот, тому що він має порівняно велику зону нечутливості, обумовлену тим, що на малих висотах час τ порівнянний із тривалістю імпульсу τ_0 , через що прямий і відбитий імпульси зливаються і їх не вдається розрізнити один від одного.

Акустичний метод виміру висоти польоту аналогічний радіохвильовому, але відрізняється лише тим, що замість електромагнітних коливань генеруються на літаку і відбиваються від Землі звукові коливання. Заснований на цьому принципі дії висотомір складається з джерела звуку А1 і приймача звуку А2, розташованих на літаку на відстані l один від одного аналогічно приймальній і передавальній антені радіовисотоміра (рис.2.3).

Час проходження звукового сигналу від літака до Землі і назад, після його відображення, залежить від швидкості руху літака (рис.2.6). [7-9]

$$t_2 = \frac{2H}{\sqrt{a^2 - v^2}}, \quad (2.9)$$

де $a = \sqrt{k \cdot g \cdot R \cdot T} \approx r_0 \cdot \sqrt{T}$ – швидкість поширення звуку в повітрі в м/с ;

k - постійна адіабати, рівна для повітря 1.4;

R - газова постійна ($R=29.27$ м/град);

T - абсолютна температура повітря в К;

v - швидкість польоту в м/с.

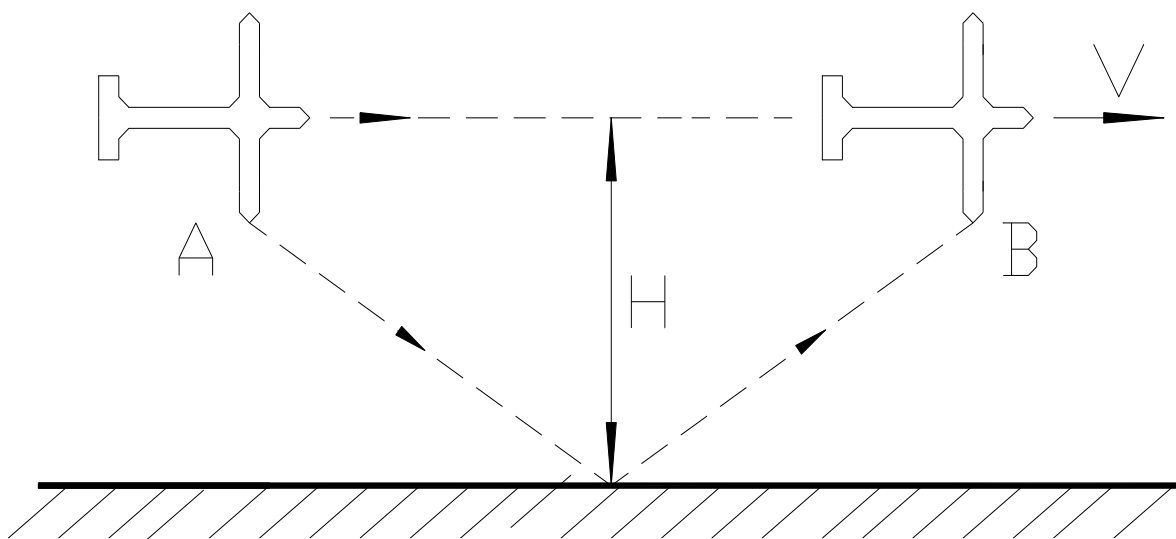


Рис. 2.6. Діаграма проходження звукових коливань від літака до Землі і назад [20].

Прямий сигнал може бути переданий від джерела звуку до приймача звуку не по повітрю, а по проводах (безпосередньо від електричного генератора звукових коливань). У цьому випадку час проходження прямого сигналу

$$t_1 = \frac{l}{c}. \quad (2.10)$$

Інтервал часу між прийомом прямого і відбитого сигналів:

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{2H}{\sqrt{a^2 - v^2}} - \frac{l}{c}. \quad (2.11)$$

З огляду на те, що час t_1 дуже малий в порівнянні з t_2 , то одержимо

$$\tau = \frac{2H}{\sqrt{a^2 - v^2}}. \quad (2.12)$$

Вимірюючи інтервал часу τ , можна визначити висоту польоту, для чого прийняті звукові сигнали потрібно перетворити в електричні. Способи виміру τ можуть бути такими ж, як і в радіовисотомірах.

Акустичному висотоміру присутні наступні методичні похибки, що відсутні в радіовисотомірах:

- температурна похибка, обумовлена тим, що швидкість поширення звуку в повітрі пропорційне кореню квадратному з абсолютної температури. Ця похибка змінює чутливість приладу (масштаб виміру). Температурна похибка може бути зменшена шляхом виміру температури навколишнього повітря і введенням у прилад схеми температурної компенсації;
- швидкісна похибка, обумовлена тим, що час проходження звукового сигналу від літака до Землі і назад залежить від швидкості руху літального апарата. При швидкості польоту, що перевищує швидкість звуку, відбитий сигнал узагалі ніколи не повернеться на літак, через що акустичний метод виміру висоти не застосуємо при польоті з надзвуковою швидкістю;
- похибка від перешкод, створюваних шумом авіадвигуна. Відносна величина цієї похибки росте зі збільшенням висоти, оскільки при цьому зменшується потужність відбитого сигналу.

Оптичний метод виміру висоти польоту аналогічний радіохвильовому і заснований на відображенні від Землі світлового променя. Передавачем служить оптичний квантовий генератор (лазер), приймачем – фотоелемент.

Співвідношення, що визначає часовий інтервал τ між прийомом прямого і відбитого сигналів, отримане для радіовисотомірів, залишається в силі і для лазерного висотоміра.

Інший варіант оптичного методу заснований на вимірі вертикальних кутів земних орієнтирів (вертикальний кут – це кут між напрямком на земний орієнтир і вертикаллю). Якщо за допомогою оптичного візира вимірити вертикальний кут φ деякого орієнтира, що лежить на лінії польоту на заздалегідь відомій відстані S , то висота польоту може бути обчислена по формулі:

$$H = S / \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.13)$$

Цей метод застосуємо в основному для контролю інших типів висотомірів під час польоту.

Інерційний метод виміру висоти польоту заснований на подвійному інтегруванні вертикального прискорення літального апарата. Висотомір,

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

побудований по цьому принципі складається з акселерометра (датчика лінійних прискорень) і інтегруючого пристрою. Вісь чутливості акселерометра орієнтована по напрямку земної вертикалі за допомогою гіростабілізуючої платформи [15].

Сигнал акселерометра пропорційний алгебраїчній сумі вертикального прискорення \ddot{H} і прискорення сили ваги g :

$$u_1 = k \cdot (\ddot{H} + g). \quad (2.14)$$

Для виключення похибки, викликаной інтегруванням прискорення сили ваги, на вхід інтегруючого пристрою необхідно подавати різницю

$$u = u_1 - u_2, \quad (2.15)$$

де $u_2 = k \cdot g$ - постійний сигнал, що компенсує вплив сили ваги.

При цьому сигнал на виході інтегруючого пристрою (після подвійного інтегрування) буде

$$y = \int_{t_0}^t dt \int_{t_0}^t u dt = k \int_{t_0}^t dt \int_{t_0}^t \ddot{H} dt = k \cdot (H - H_0), \quad (2.16)$$

де H_0 - висота, що відповідає початку інтегрування.

При $H_0=0$ сигнал інерційного висотоміра буде пропорційний відносній висоті польоту.

Похибка інерційного висотоміра складаються з похибок акселерометра, похибок від неточної компенсації сили ваги і похибок інтегруючого пристрою. Основним недоліком методу є наростання похибки з часом. Тому для реалізації інерційного методу необхідні прецизійні пристрої [5].

У результаті зіставлення розглянутих методів можна установити, що дійсну висоту польоту вимірюють радіовисотоміри, акустичні й оптичні висотоміри, тобто висотоміри, засновані на властивостях земної поверхні відбивати хвильові коливання; інерційний метод вимірює відносну висоту, а барометричний висотомір – барометричну висоту.

Основне застосування на літальних апаратах знайшли барометричний, радіотехнічний і в меншому ступені інерційний методи виміру висоти польоту. Область застосування інерційного методу обмежена літальними апаратами короткочасної дії через наростання з часом похибки виміру висоти [7].

У даному дипломному проекті ми віддали перевагу барометричному методу перед радіотехнічним, тому що барометричний метод найбільше

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		13

підходить для проектування аерогравіметричного висотоміра з заданими характеристиками, і ми зможемо домогтися необхідної точності виміру і зменшити вплив різних дестабілізуючих факторів [5].

Узявши за основу барометричний метод виміру висоти і використовувачи визначене конструктивне рішення ми постарасмося досягти поставленого перед нами завдання спроектувати аерогравіметричний висотомір.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		14

3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Вивід барометричної формули

Барометричний метод виміру висоти польоту заснований на використанні закону зміни тиску повітря зі збільшенням висоти. Цю залежність можна одержати наступним розрахунковим шляхом.

Виділимо в атмосфері вертикальний стовп повітря постійного перетину F (рис. 3.1). Тиск повітря в основі цього стовпця (на нульовій висоті) позначимо через P_0 , а тиск повітря на деякій висоті H через P_H .

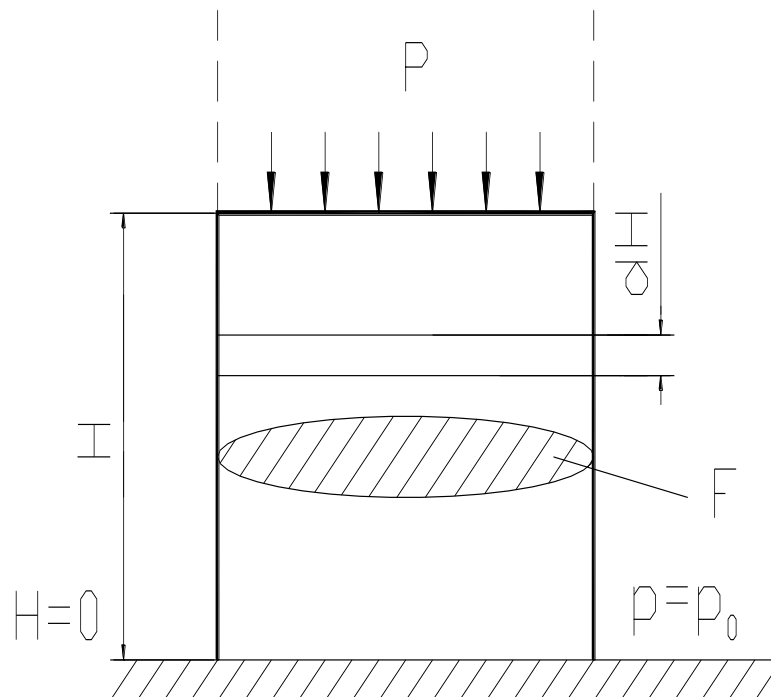


Рис. 3.1. До виводу барометричної формули

Якщо виділити усередині такого стовпця повітря елементарний шар товщиною dH , то різниця тисків dP , що діє на цей шар, врівноважується вагою повітря, укладеного усередині шару, тобто:

$$-F \cdot dP = F \cdot \rho \cdot g \cdot dH, \quad (3.1.1)$$

де ρ – вагова щільність повітря усередині шару, в $H / м^3$.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		15

Знак "-" у рівнянні означає, що позитивному збільшенню висоти супроводжує негативне збільшення тиску (зі збільшенням висоти тиск зменшується).

Відомо, що між ваговою щільністю, абсолютним тиском і температурою

газу існує залежність : [8]

$$\rho = \frac{P}{R_{num} \cdot T}, \quad (3.1.2)$$

де P – абсолютний тиск, $Па$; R_{num} – питома газова постійна ($R_{num} = 287.05287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); T – температура, $К$.

Рівняння (3.1.1) після підстановки в нього (3.1.2) можна привести до виду:

$$\frac{dp}{p} = - \frac{1}{R_{num} \cdot T} \cdot g \cdot dh,$$

чи після множення і розподілу правої частини на g_e :

$$\frac{dp}{p} = - \frac{g_e}{R_{num} \cdot T} \cdot \frac{g \cdot dh}{g_e}, \quad (3.1.3)$$

Зробивши в правій частині заміну з обліком того, що збільшення геопотенціалу, віднесене до стандартного прискорення, дає збільшення геопотенціальної висоти:

$$dH = \frac{dP}{g_0} = \frac{g \cdot dh}{g_e}, \quad (3.1.4)$$

де g_e – прискорення вільного падіння, $g_e = 9,80665 \text{ м/с}^2$. Геопотенціал чи, що те ж, потенціал сили ваги виражає питому (віднесену до одиниці маси) потенційну енергію часток атмосфери щодо нульового рівня.

Одержимо

$$\frac{dp}{p} = - \frac{g_e}{R_{num} \cdot T} \cdot dH. \quad (3.1.5)$$

Для інтегрування рівняння (3.1.5) необхідно в його правій частині виразити T через H .

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		16

$$T = T_0 + \beta \cdot (H - H_0), \quad (3.1.6)$$

де T_0 і H_0 – температура і тиск, що відповідає початку інтервалу $H_0 = 0$ м, $T_0 = 288.15$ К.

Якщо підставити (3.1.6) у (3.1.5), то одержимо диференціальне рівняння з розділеними перемінними:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g_c}{R_{num}} \cdot \frac{dH}{T_0 + \beta \cdot (H - H_0)}, \quad (3.1.7)$$

Інтегруючи ліву частину рівняння (3.1.7) у межах від P_0 до P , а праву в межах від H_0 до H , одержимо:

$$P = P_0 \cdot \left[1 + \frac{\beta \cdot (H - H_0)}{T_0} \right]^{\frac{-g_c}{\beta \cdot R_{num}}}, \quad (3.1.8)$$

де β – температурний градієнт, $\beta = -0.0065$ К/м;

P_0 – початковий тиск,

$$P_0 = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$$

У такий спосіб необхідний нам тиск буде мати вигляд:

$$P = P_0 \cdot \left[1 + \frac{\beta \cdot H}{T_0} \right]^{\frac{-g_c}{\beta \cdot R_{num}}}. \quad (3.1.9)$$

Рівняння (3.1.8) може бути вирішене відносно H , і з обліком наших умов буде мати вигляд:

$$H = \frac{T_0}{\beta} \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\frac{\beta \cdot R_{num}}{g_c}} - 1 \right]. \quad (3.1.10)$$

З формули (3.1.10) видно, що вимірювана висота є функцією чотирьох параметрів:

$$H = f(P, P_0, T_0, \beta).$$

Звідси випливає, що барометричний метод виміру дозволяє обчислити висоту польоту щодо будь-якого рівня, якщо відомі значення P, P_0, T_0 і β . Для нашого випадку параметри (P_0, T_0 і β) є постійними, і тому висота однозначно визначається тиском.

$$H = f(P).$$

3.2. Конструкція й опис роботи аеро-гравіметричного висотоміра

Механізм приладу змонтований у герметичному корпусі діаметром 90 мм. Анероїдні коробки 11 (три коробки узяті для збільшення чутливості приладу), що є чуттєвим елементом приладу, реагують на статичний тиск на висоті польоту, поданий в корпус аерогравіметричного висотоміра. При зміні висоти польоту коробки деформуються; деформація коробок через укріпленій у верхньому твердому центрі біметалічний компенсатор 1-го роду 10, тягу 9, біметалічний компенсатор 2-го роду 7 передається на валик 8. При повороті валика 8 повертається зубчатий сектор 4, що обертає трибку 14. На цій же осі знаходиться стрілка і потенціометр.

Параметри анероїдної коробки і передатного механізму підібрані таким чином, що при підйомі на висоту 500 м стрілка робить один оборот. При цьому зовнішня шкала приладу проградуєрована в сотнях і десятках метрів.

Для компенсації інструментальних температурних похибок приладу мають біметалічні компенсатори 1 і 2-го роду 10 і 7.

Для усунення методичних похибок весь механізм разом з анероїдними коробками і зубчастими колісьми укріпленій на підставі 3, що за допомогою кремальєри 15 може повертатися навколо своєї осі, що збігає з віссю стрілки.

Одночасно з поворотом підстави 3 повертається шкала барометричного тиску 2, оцифровка якої видна через виріз у бічній частині шкали 1 приладу.

Для статичного зрівноважування маси анероїдних коробок застосована противага 5, шарнірно з'єднана з валиком 8. Плоска пружина 5 служить для вибору люфтів.

Шкала приладу має ціну розподілу 5мм/поділ.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		18

3.3. Розрахунок основних елементів конструкції

3.3.1. Розрахунок анероїдної коробки

Розраховуючи анероїдну коробку, ми враховуємо, що до складу блоку анероїдних коробок входять три такі коробки, що зроблено для збільшення чутливості приладу. Розрахунок ведемо відповідно до методики, викладеної в [1].

Вихідні дані для розрахунку:

- вимірювана зміна тиску

$$\begin{aligned}\Delta P &= 101325 \cdot \left(1 + \frac{-0.0065 \cdot 3000}{288.15}\right)^{-\frac{9.80665}{-0.0065 \cdot 287.05287}} - \\ &- 101325 \left(1 + \frac{-0.0065 \cdot 3500}{288.15}\right)^{-\frac{9.80665}{-0.0065 \cdot 287.05287}} = \\ &= 4344.462 \text{ Па}\end{aligned}$$

- максимальний прогин блоку анероїдних коробок 3 мм, однієї мембрани $\omega_0 = 0,5 \text{ мм}$;

- радіус мембрани $R = 25 \text{ мм}$;

- матеріал – берилієва бронза БрБ2, яка відноситься до матеріалів з найбільш високими властивостями пружності, це матеріали з групи сплавів дисперсійно-твердіючих, які відрізняються високою пластичністю, одержаної в процесі відпуску-старіння. Практично повне зняття залишкових напруг при відпустці дозволяє сильно знизити недосконалості властивостей пружності. Основні характеристики БрБ2 необхідні нам для розрахунку [12]:

- модуль пружності $E = 1,33 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;
- границя текучості $G_m = 1280 \text{ МПа}$;
- межа міцності $G_{np} = 1350 \text{ МПа}$;
- межа пружності $G_y = 960 \text{ МПа}$;

- профіль мембрани – синусоїдальний.

Тому що мембранний чуттєвий елемент призначений для виміру висоти, зв'язаної з тиском, то при проектуванні необхідно насамперед побудувати

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

пружну характеристику по тиску. Для цього використовуємо барометричну формулу $P=f(H)$ (1.1.9) і зворотню залежність показань приладу від переміщення твердого центра блоку коробок:

$$\omega = \sin\left(\frac{H - 3000}{k}\right) \cdot \frac{d}{6}, \quad (3.3.1)$$

де $(H-3000)$ – показання приладу в метрах;

k – коефіцієнт передачі від осі передатнього механізму до шкали:

$$k = \frac{A_{ш} \cdot k_1}{\alpha_{стр}}$$

де k_1 – передатне відношення між зубчатим сектором і трибкою на осі стрілки, $k_1=11$;

$A_{ш}$ – розмір шкали; $A_{ш}=5000\text{м}$;

$\alpha_{стр}$ – максимальний кут повороту стрілки, $\alpha_{стр}=330^\circ=5,76\text{ рад}$;

d – довжина плеча в передатньо-множному механізмі, $d=6\text{мм}$.

$$k = \frac{500 \cdot 11}{5.76} = 954.93 \frac{\text{м}}{\text{рад}}$$

Остаточно маємо:

$$\omega = f(H - 3000) = \sin\left(\frac{H - 3000}{954.93}\right).$$

Користуючись нашою залежністю між деформаціями центра мембрани $\omega=f(H-3000)$ і надлишкового тиску $P=f(H-300)$ визначаємо пружну характеристику мембрани:

$$\frac{P \cdot R^4}{E \cdot h^4} = a \cdot \frac{\omega}{h} + b \cdot \frac{\omega^3}{h^3}. \quad (3.3.2)$$

Апроксимуємо отриману характеристику $\omega=f(H-3000)$ кубічним рівнянням

$$P = A \cdot \omega + B \cdot \omega^3 \quad (3.3.3)$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

методом найменших квадратів.

Порівнюючи два останніх рівняння, встановлюємо співвідношення між коефіцієнтами цих рівнянь

$$A = \frac{E}{R^4} \cdot h^3 \cdot a; \quad B = \frac{E}{R^4} \cdot h \cdot b. \quad (3.3.4)$$

Виключивши з рівнянь (3.3.3) і (3.3.4) товщину мембрани h , одержимо

$$\frac{a}{b^3} = \frac{A}{B^3} \cdot \left(\frac{E}{R^4} \right)^2 \quad (3.3.5)$$

Коефіцієнти a і b залежать від форми і розмірів гофра і визначаються по формулах:

$$a = \frac{2 \cdot (3 + \alpha) \cdot (1 + \alpha)}{3 \cdot k \cdot 1 \left(1 - \frac{\mu^2}{\alpha^2} \right)}; \quad (3.3.6)$$

$$b = \frac{32 \cdot k \cdot 1}{\alpha^2 - 9} \cdot \left[\frac{1}{6} - \frac{3 - \mu}{(\alpha - 3) \cdot (\alpha + 3)} \right]; \quad (3.3.7)$$

де μ -коефіцієнт Пуассона, $\mu = 0.3$.

Для синусоїдального профілю мембрани

$$k_1 = 1; \quad k_2 = \frac{3 \cdot H^2}{2 \cdot h^2} + 1; \quad \alpha^2 = k_1 \cdot k_2,$$

де H – глибина гофрування; h – товщина матеріалу.

Змінюючи відносну глибину гофрування H/h домагаємося рівності вираження (3.3.5). У цьому рівнянні коефіцієнти a і b змінюються в залежності від значення H/h . Коефіцієнти A і B знаходяться методом найменших квадратів.

Далі по одній з формул (3.3.4) обчислюємо товщину мембрани h :

$$h = \frac{B \cdot R^4}{E \cdot b}. \quad (3.3.8)$$

Глибина гофрування H дорівнює:

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		21

$$H = \left(\frac{H}{h} \right) \cdot h. \quad (3.3.9)$$

Значення ефективної площі з достатньою для практики точністю визначаємо з наступного рівняння [18]:

$$F_{ef} = \frac{1}{3} \pi \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2), \quad (3.3.10)$$

де R – радіус твердого центра.

Приймаючи $r = 5 \text{ мм}$, маємо:

$$F_{ef} = \frac{1}{3} \pi \cdot (25^2 + 25 \cdot 5 + 5^2) = 811.6 \text{ мм}^2.$$

3.3.2. Кінематичний розрахунок механізму

Визначаємо залежність кута повороту стрілки $\alpha_{стр}$ від переміщення твердого центра блоку анероїдних коробок:

$$\alpha_{стр} = \alpha_{вал} \cdot \frac{z_c}{z_{тр}} = \arcsin \frac{\omega_0}{d} \cdot \frac{z_c}{z_{тр}}, \quad (3.3.11)$$

де $\alpha_{вал}$ – максимальний кут повороту передатнього механізму;

ω_0 – максимальне переміщення твердого центра;

d – плече передатнього механізму (відстань між біметалічним компенсатором 2-го роду і віссю).

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		22

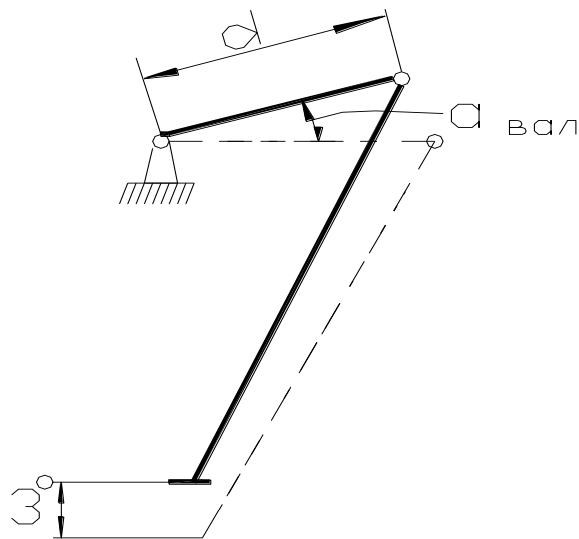


Рис. 3.2. До розрахунку синусного механізму

З вихідних даних: $\omega_0 = 3 \text{ мм}$. Задаючи $\alpha_{\text{стр}} = 330^\circ = 5,76 \text{ рад}$;
 $i_{\text{тр.с}} = 11$ маємо:

$$d = \frac{\omega_0}{\sin \frac{\alpha_{\text{стр}}}{i_{\text{тр.с}}}} = \frac{3}{\sin \frac{5,76}{11}} = 6 \text{ мм}.$$

Визначимо параметри шкали висоти.

Межі зміни шкали 0...5000м.

Число розподілів 100.

Ціна розподілів 50.

Шкала має 6 головних оцінок.

Визначимо радіус зубчатого сектора і радіус трибки.

Тому що

$$i_{\text{тр.с}} = \frac{r_c}{r_{\text{тр}}} = 11,$$

то задаючи $r_{\text{тр}} = 1,5 \text{ мм}$, ми маємо

$$r_c = r_{\text{тр}} \cdot i_{\text{тр.с}} = 1,5 \cdot 11 = 16,5 \text{ мм}.$$

3.3.3. Розрахунок зубчатого зачеплення

Розрахунок на ізгибну міцність робимо для зачеплення зубчатий сектор - трибка .

Модуль зачеплення в мм визначаємо по формулах для циліндричної прямозубої передачі з умови:

$$m = k_m \cdot \sqrt[3]{M \cdot k_\beta \cdot Y_F / (z \cdot \psi_{\text{вт}} \cdot [\sigma]_F)}, \quad (3.3.12)$$

де M – крутящий момент, діючий на колесо, що розраховується, $H^* \text{мм}$;

Y_F – коефіцієнт форми зуба, $Y_F = 4.8$;

k_β - коефіцієнт нерівномірності навантаження по ширині колеса, приймаємо $k_\beta = 1$;

Z – число зубів трибки, $Z = 10$;

$\varphi_{\text{вт}}$ – коефіцієнт, дорівнює відношенню ширини зубчатого вінця до модуля; значення коефіцієнта лежить в межах $3 \leq \varphi_{\text{вт}} \leq 16$, приймаємо $\varphi_{\text{вт}} = 6$;

$[\sigma]_F$ – допустиме напруження при розрахунку зубів на вигин, МПа; залежить при розрахунку зубів від міцнісних характеристик обраного матеріалу.

Матеріалом для зубчатого сектора і трибки оберемо сталь марки 35 ДСТ 1050-84, для якої границя витривалості $\sigma_{-1} = 315 \text{ МПа}$. Тоді припустиму напругу на вигин визначаємо по формулі:

$$[\sigma]_F = \frac{\sigma_{-1}}{n}, \quad (3.3.13)$$

де n – запас міцності, $n = 1.5$.

$$[\sigma]_F = \frac{315}{1.5} = 210 \text{ МПа}.$$

Тому що матеріали коліс, що сполучаються, однакові, то розрахунок на вигин ведемо для меншого колеса, тобто трибки.

Визначимо крутящий момент, діючий на трибку:

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		24

$$M = \frac{Q \cdot d}{i_{mp.c}}, \quad (3.3.14)$$

де Q – тягова сила мембрани, що ми знаходимо по формулі [18]:

$$Q = \Delta P \cdot F_{ef}, \quad (3.3.15)$$

$$Q = 4344.462 \cdot 811.6 \cdot 10^{-6} = 3.53H,$$

$i_{mp.c}$ – передатне відношення між сектором і трибкою, $i_{mp.c} = 11$.
Тоді

$$M = \frac{3.53 \cdot 6}{11} = 1.923 \text{ Нмм}$$

Підставляючи у формулу отримані дані, маємо:

$$m \geq 1.4 \cdot \sqrt[3]{1.923 \cdot 1 \cdot 4.8 / 10 \cdot 6 \cdot 210} = 0.126$$

З конструктивних розумінь вибираємо модуль зачеплення $0,3\text{мм}$.

Проведемо розрахунок зубів на контактну міцність. При цьому визначається значення міжосьової відстані a_ω :

$$a_\omega \geq K_a \cdot (i_{mp.c} + 1) \cdot \sqrt[3]{M_c \cdot K_\beta / i_{mp.c}^2 \cdot \psi_{ва} \cdot [\sigma_H]^2}, \quad (3.3.16)$$

де $K_a = \sqrt[3]{0.55 \cdot K_\beta \cdot E_{np}}$.

У приведених формулах:

$[\sigma_H]$ – припустима контактна напруга, для сталі 35 $[\sigma_H] = 390 \text{ МПа}$;

E_{np} – приведений модуль пружності, для сталевих коліс $E_{np} = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

M_c – момент, що крутить, на валу зубчатого сектора:

$$M_c = Q \cdot d, \quad (3.3.17)$$

$$M_c = 3.5 \cdot 6 = 21.18 \text{ Нмм};$$

$\varphi_{ва}$ – коефіцієнт ширини колеса ($\varphi_{ва} = 0,1 \dots 0,4$), приймаємо $\varphi_{ва} = 0,1$;

K_β – коефіцієнт динамічного навантаження, $K_\beta = 1$.

Тоді

$$K_a = \sqrt[3]{0.55 \cdot 1 \cdot 2.15 \cdot 10^5} = 49.1$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		25

$$a_{\omega} = 49.1 \cdot (11 + 1) \cdot \sqrt[3]{21.16 \cdot 1 / (11^2 \cdot 0.1 \cdot 390^2)} = 13.3 \text{ мм}.$$

Дійсне значення міжосьової відстані знаходимо по формулі:

$$a = \frac{m \cdot (z_{mp} + z_c)}{2}, \quad (3.3.18)$$

$$a = \frac{0.3 \cdot (10 + 110)}{2} = 18 \text{ мм}.$$

Відповідно до наших розрахунків зубчата пара трибка-зубчатий сектор задовольняє розрахунку на контактну міцність і розрахунку на вигин.

3.3.4. Розрахунок спіральної пружини

Геометричні параметри моментної спіральної пружини (волоска) розраховуємо в залежності від необхідного моменту.

Тому що спіральна пружина використовується для силового замикання кінематичного ланцюга приладу, то її мінімальний момент знаходимо в залежності від значення моменту тертя, приведенного до її осі:

$$M = n \cdot M_{mp.np}, \quad (3.3.19)$$

де n - коефіцієнт запасу, беремо $n=3$.

Визначимо приведений момент тертя:

$$M_{mp.np} = M_{mp1} \cdot i_{c,mp} + M_{mp2}, \quad (3.3.20)$$

де M_{mp1} – момент тертя підшипника ковзання, встановленого на осі передавального механізму, $M_{mp1} = 0.0032 \text{ Нмм}$;

$i_{c,mp}$ - передатне відношення трибка-зубчатий сектор, $i_{c,mp} = 1/11$;

M_{mp2} – момент тертя в опорі на центрах:

$$M_{mp2} = \frac{Q_2 \cdot f \cdot d_{сер}}{2 \cdot \cos \alpha}, \quad (3.3.21)$$

де $d_{сер}$ – середній діаметр опорної поверхні, $d_{сер} = 2 \text{ мм}$;

α - половинний кут при вершині цапфи, $\alpha = 30^\circ$;

Q_2 – вага деталей на осі волоска, $Q_2 = 0,4 \text{ Н}$;

f – коефіцієнт тертя, $f = 0,05$.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		26

Тоді

$$M_{mp2} = \frac{0.05 \cdot 0.4 \cdot 2}{2 \cdot \cos 30} = 0.023 \text{ Нмм}.$$

Остаточньо маємо:

$$M_{mp.np} = 0.0032 \cdot \frac{1}{11} + 0.023 = 0.0234 \text{ Нмм},$$

$$M = 3 \cdot 0.0234 = 0.07 \text{ Нмм}.$$

Геометричні параметри пружини по [18] з рівнянь міцності і твердості:

$$\sigma_F = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma_F], \quad (3.3.22)$$

$$\varphi_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot L}{E \cdot I}, \quad (3.3.23)$$

де $I = b \cdot h^3 / 12$ і $W = b \cdot h^2 / 6$ – відповідно моменти інерції й опору волоска (b – ширина, h – товщина, L – довжина пружини).

Довжина моментної пружини може бути знайдена з умови рівності площ:

$$\pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 = L \cdot a, \quad (3.3.24)$$

де D – зовнішній діаметр спіральної пружини, приймаємо $D = 15 \text{ мм}$;

d – діаметр втулки, у якій кріпиться внутрішній кінець спіральної пружини, $d = 2 \text{ мм}$;

a – крок спіралі, вибирається в залежності від товщини пружини h ($a = k \cdot h$),

де $k = 7 \dots 8$, приймаємо $k = 8$.

Підставивши значення кроку спіралі в рівняння (3.3.24) і вирішивши спільно рівняння (3.3.22) - (3.3.24), знайдемо товщину пружини:

$$h = \sqrt{\frac{\pi \cdot [\sigma_F] \cdot (D^2 - d^2)}{2 \cdot k \cdot E \cdot \varphi_{\max}}}, \quad (3.3.25)$$

де $[\sigma_F]$ – допустима напруга на вигин:

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_y}{n_\sigma}.$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		27

Для матеріалу волоска бронзи БрОФ6,5-0,15 $\sigma_y = 450 \text{ МПа}$, n_σ - коефіцієнт запасу по нормальних напругах, $n_\sigma = 3$.

$$[\sigma_F] = \frac{450}{3} = 15 \text{ МПа} ;$$

E – модуль пружності матеріалу пружини, $E = 11.2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$;

φ_{\max} – максимальний кут повороту пружини, $\varphi_{\max} = 330^\circ = 5,76 \text{ рад}$.

Маємо

$$h = \sqrt{\frac{\pi \cdot 150 \cdot (15^2 - 2^2)}{2 \cdot 8 \cdot 11.2 \cdot 10^4 \cdot 5.76}} = 0.1 \text{ мм} .$$

Ширину пружини визначаємо з рівняння (3.3.22):

$$b = \frac{6 \cdot M_{\max}}{h^2 \cdot [\sigma_F]} = \frac{6 \cdot 0.07}{0.1^2 \cdot 150} = 0.28 \text{ мм}.$$

Остаточно значення h і b вибираємо по сортаменту металевих стрічок, причому з умовою $20 > b/h > 3$. Вибираємо волосок з параметрами $h = 0.1 \text{ мм}$ і $b = 0.3 \text{ мм}$.

З рівняння (3.3.23) знаходимо довжину пружини:

$$L = \frac{b \cdot h^3 \cdot E}{12 \cdot M_{\max}} \cdot \varphi_{\max} = \frac{0.3 \cdot 0.1^3 \cdot 11.2 \cdot 10^4}{12 \cdot 0.07} \cdot 5.76 = 230.4 \text{ Нмм}.$$

Число витків і крок спіралі визначимо по формулі:

$$h = \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot (D + d)} = \frac{2 \cdot 230.4}{\pi \cdot (15 + 2)} = 8.63,$$

$$a = \frac{D - d}{2 \cdot h} = \frac{15 - 3}{2 \cdot 8.63} = 0.75 \text{ мм}.$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		28

3.3.5. Розрахунок підшипників ковзання

Підшипники ковзання, що працюють у режимі напівсухого тертя, розраховують по середньому тиску P між цапфою і вкладишем і добутком цього тиску на окружну швидкість V ковзання цапфи, тобто по величині $P \cdot V$. Тиск характеризує несучу здатність підшипника, а добуток $P \cdot V$ – знос підшипник, тепловиділення в ньому і ступінь небезпеки заїдання цапфи [27].

Для нормальної роботи підшипника ковзання необхідно, щоб значення P і $P \cdot V$ не перевищували припустимих $[P]$ і $[P \cdot V]$. Розраховуємо підшипник ковзання, у якому кріпиться вісь передатного механізму. Діаметр d цапфи підшипника визначаємо конструктивно в залежності від діаметра вала. Приймаємо $d=1$ мм при ступінчастій осі з діаметром ступінь 5 мм і 3 мм. Довжину цапфи (вкладиша) підшипника призначаємо в залежності від обраного нами діаметра $d \cdot l = (0,3 \dots 5) \cdot d$. Приймаємо довжину цапфи $l=3$ мм.

Розрахунок підшипників ковзання по середньому тиску між цапфою і вкладишем, що охоплює цапфу, робимо по формулі:

$$P = \frac{F}{d \cdot l} \leq [P], \quad (3.3.26)$$

де F – радіальне навантаження на підшипник.

Визначимо вагу передатного механізму. Вісь розраховуємо як циліндр із розмірами діаметра 5 мм на довжину 45 мм. Матеріал сталь, тому щільність $\rho = 7800 \text{ кг} / \text{м}^3$.

$$\begin{aligned} Q_{oci} &= m_{oci} \cdot g = V_{oci} \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{\pi (5 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 7800 \cdot 9.80665 \cdot 0.045 = 0.068 \text{ Н} \end{aligned}$$

Вагу зубчатого сектора розраховуємо, з огляду на те, що його товщина $h=2$ мм, дільний діаметр $d=33$ мм, кут сектора 45° .

$$\begin{aligned} Q_{3.c} &= m_{3.c} \cdot g = V_{3.c} \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{\pi \cdot (33 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \frac{45}{360} \cdot 0.002 \cdot 7800 \cdot 9.80665 = 0.016 \text{ Н} \end{aligned}$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		29

Загальна вага передатного механізму склала $0,084\text{ Н}$, а з обліком різних кріпильних пристосувань на осі механізму ми можемо прийняти вагу, рівній $0,1\text{ Н}$.

Тоді

$$P = \frac{0.1}{1.3} = 0.033\text{ МПа}.$$

Матеріал підшипника бронза БрОФ10-1, а цапфи – сталь. Для таких умов $[P]=2\text{ МПа}$; що цілком задовольняє нашим розрахункам. Вести перевірку по значенням $P \cdot V$ у нашому випадку немає необхідності.

Для подальших розрахунків нам буде необхідний момент тертя в підшипнику:

$$M_{тр} = 1.27 \cdot F \cdot f \cdot r, \quad (3.3.27)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання, $f=0,05$.

$$M_{тр} = 1.27 \cdot 0.1 \cdot 0.05 \cdot 0.5 = 0.0032\text{ Нмм}.$$

3.3.6. Розрахунок термобіметалічного компенсатора 1-го роду

Розраховуємо наступні геометричні параметри термобіметалічного компенсатора 1-го роду, що компенсує інструментальну температурну похибку.

Відповідно до формули (3.6.15) похибка ΔH складається з двох частин:

$$\Delta H = A \cdot \Delta \theta + B \cdot H \cdot \Delta \theta,$$

де
$$A = \frac{\alpha_E \cdot R_{уд} \cdot T_0}{g_c}; \quad B = \frac{\alpha_E \cdot R_{уд} \cdot \beta}{g_c}.$$

і відповідно до зроблених в п. 3.6.2 розрахункам $A \cdot \Delta \theta = 5,23\text{ м}$, при цьому зміну температури $\Delta \theta$ ми беремо 20°C . Тоді коефіцієнт $A = 0,26\text{ м}/^\circ\text{C}$.

Використовуючи барометричну формулу, визначимо на скільки зміниться тиск при зміні висоти на $0,26\text{ м}$.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$\Delta P = 101325 - 101325 \left(1 + \frac{-0.0065 \cdot 0.26}{288.15} \right)^{-\frac{9.80665}{-0.0065 \cdot 287.05287}} =$$

$$= 3.19 \text{ Па} = 3.19 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}$$

Далі визначимо переміщення твердого центра. Переміщення ω_1 однієї мембрани можна визначити по формулі:

$$\Delta P' = A \cdot \omega_1 + B \cdot \omega_1^3, \quad (3.3.28)$$

де значення коефіцієнтів:

$$A = 8.439 \cdot 10^{-3}; \quad B = 9.4585 \cdot 10^{-4}.$$

Тоді

$$3.19 \cdot 10^{-6} = 8.439 \cdot 10^{-6} \omega_1 + 9.4585 \cdot 10^{-4} \omega_1^3$$

Вирішуючи це рівняння, визначимо переміщення центра однієї мембрани:

$$\omega_1 = 3.75 \cdot 10^{-3} \text{ мм}.$$

Переміщення твердого центра блоку анероїдних коробок буде в 6 разів більше:

$$\omega = 6 \cdot \omega_1 = 6 \cdot 3.78 \cdot 10^{-3} = 2.27 \cdot 10^{-2} \text{ мм}.$$

Отже, таким повинне бути переміщення вільного кінця біметалу при зміні температури на 1°C .

При зміні температури на величину $\Delta\theta$ найбільший прогин λ вільного кінця прямої пружини, закріпленої одним кінцем як консоль, визначається по формулі :

$$\lambda = 0.75 \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{h_1 + h_2} \cdot l^2 \cdot \Delta\theta, \quad (3.3.29)$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнти лінійного розширення активного і пасивного шарів відповідно;

h_1 і h_2 – товщина активного і пасивного шару відповідно;

l – довжина біметалу;

$\Delta\theta$ – зміна температури, що викликає переміщення λ .

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Для компенсатора вибираємо біметал марки ТБ 2013. Він має наступні характеристики :

- марки матеріалів активного/пасивного шару 75 ГНД /36 Н;
- рекомендований температурний діапазон $-60 \dots +200^{\circ}\text{C}$;
- коефіцієнт лінійного розширення

$$24 \dots 26 \cdot 10^{-6} / 1 \dots 1,5 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$$

- модуль пружності $12 \cdot 10^4 / 15 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

З конструктивних розумінь вибираємо товщину біметалу:

$$h = h_1 + h_2 = 1.5 \text{ мм}.$$

Товщина активного і пасивного шарів з умови найбільшої чутливості :

$$\frac{h_1}{h_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 10^4}{15 \cdot 10^4}} = 0.89$$

Вирішуючи систему рівнянь:

$$\begin{cases} h_1 = 0.89 \cdot h_2 \\ h_1 + h_2 = 1.5 \end{cases} \quad (3.3.30)$$

визначаємо товщину активного і пасивного шарів біметалу:

$$h_1 = 0.71 \text{ мм}; \quad h_2 = 0.79 \text{ мм}.$$

З формули (3.3.29) визначимо довжину біметалу:

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{\frac{\lambda \cdot (h_1 + h_2)}{0.75 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta\theta}} = \\ &= \sqrt{\frac{2.27 \cdot 10^{-2} \cdot (0.71 + 0.79)}{0.75 \cdot (26 - 1) \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 42.6 \text{ мм} \end{aligned}$$

Термобіметаличний компенсатор 1-го роду розрахований.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		32

3.3.7. Розрахунок термобіметалічного компенсатора 2-го роду

Другий доданок у формулі (3.6.15) $B \cdot H \cdot \Delta\theta$ залежить від висоти. При підвищенні температури і постійному тиску деформації коробки будуть зростати. Для того, щоб стрілка приладу не переміщалася, необхідно зменшити передатне число шляхом збільшення довжини кривошипа, що досягається шляхом застосування біметалічної пластини [6].

Похибка виміру висоти буде позначатися на шкалі приладу. Поворот стрілки буде менше (тому що другий доданок має знак “-”) на величину:

$$\alpha' = \alpha \cdot B, \quad (3.3.31)$$

де α – максимальний кут повороту стрілки, $\alpha = 330^\circ$;

λ – температурний коефіцієнт модуля пружності, $\lambda = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.
Відповідно до наших розрахунків у п. 3.4.2

$$B \cdot H \cdot \Delta\theta = 0,35 \text{ м,}$$

відкіля B дорівнює при значеннях $H = 3000$ і $\Delta\theta = 20^\circ\text{C}$.

$$B = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C};$$

$$\alpha' = 330 \cdot 5,9 \cdot 10^{-6} = 1,95 \cdot 10^{-3}.$$

З передатного відношення приладу маємо:

$$\alpha - \alpha' = i_{mp.c} \cdot \arcsin \frac{\omega_0}{d'}, \quad (3.3.32)$$

де $i_{mp.c}$ – передатне відношення, $i_{mp.c} = 11$;

ω_0 – максимальний прогин блоку анероїдних коробок, $\omega_0 = 3 \text{ мм}$;

d' – довжина плеча передатного механізму, необхідного для компенсації похибки.

Звідси

$$d' = \frac{\omega_0}{\sin\left(\frac{\alpha - \alpha'}{i_{mp.c}}\right)} = \frac{2}{\sin\left(\frac{330 - 1,95 \cdot 10^{-3}}{11}\right)} = 6 + 3,21 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

Для компенсації похибки необхідно підібрати біметал з чутливістю

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		33

$$\delta = \frac{\lambda}{\Delta\theta} = 3.21 \cdot 10^{-5} \text{ мм/}^{\circ}\text{C},$$

де λ - переміщення кінцевої крапки при нагріванні на 1°C .

Визначимо відстань від місця кріплення компенсатора до місця приєднання тяги.

Розрахунок ведемо за методикою, викладеної в [1]. Вибираємо термобіметал із наступними технічними характеристиками:

- марка ТБ0831;
- марка матеріалів активного/пасивного шарів 24НХ/50Н;
- питомий вигин 0,075 $1/^{\circ}\text{C}$;
- коефіцієнт лінійного розширення $17-19/8,5-9 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$;
- модуль пружності $19/16,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

З конструктивних розумінь вибираємо габаритні розміри компенсатора:

товщина $h = 1,5 \text{ мм}$;

ширина $b = 4 \text{ мм}$.

Переміщення вільного кінця пружини можна визначити по формулі:

$$\lambda = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{h} \cdot l^2 \cdot \Delta\theta, \quad (3.3.33)$$

де α_1 і α_2 -- коефіцієнти лінійного розширення, відповідно активного і пасивного шару.

$$l = \sqrt{\frac{4 \cdot \lambda \cdot h}{3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta\theta}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.21 \cdot 10^{-5} \cdot 1.5}{3 \cdot (17 - 9) \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 2.83 \text{ мм}$$

Виходить, відстань від місця кріплення термобіметалічної пружини до місця кріплення тяги приймаємо рівній 3 мм .

3.3.8. Розрахунок потенціометра

Розрахунок лінійного дротового потенціометра заключається у визначенні діаметра намотувального проводу і геометричних розмірів каркаса.

Вихідними даними для нашого розрахунку є:

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		34

- Загальний опір $R_0=2000 \text{ Ом}$;
- Вхідна напруга $U_0=24 \text{ В}$;
- Середній діаметр каркаса $D_0=23 \text{ мм}$.

Дійсна потужність розсіювання визначається по формулі :

$$P = \frac{U_0^2}{R_0}, \quad (3.3.34)$$

$$P = 24^2 / 2000 = 0.288 \text{ Вт}.$$

Вибір діаметра дроту визначається тепловим режимом роботи потенціометра. При занадто маленькому діаметрі відбувається перегрів потенціометра, а вибір великого діаметра обмежується припустимими габаритами потенціометра [8].

Діаметр дроту без ізоляції:

$$d = \sqrt[4]{16 \cdot P / \pi^2 \cdot j^2 \cdot R_0}, \quad (3.3.35)$$

де j – припустима щільність струму, приймаємо $j=10 \text{ А/мм}^2$

$$d = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot 0.288}{\pi^2 \cdot 10^2 \cdot 2000}} = 0.039 \text{ мм}.$$

Отримане значення d округляємо до найближчого з ряду номінальних діаметрів $d=0,04 \text{ мм}$.

Число витків обмотки:

$$w = \frac{\alpha_0 \cdot D_0 \cdot \pi / 360}{t}, \quad (3.3.36)$$

де α_0 – робочий кут повороту движка, $\alpha_0=330^\circ\text{C}$;

t – крок намотування, мм.

Тому що в нас щільне намотування проводу з ізоляцією, то $t=d_u+(0,012 \dots 0,015)$, де d_u – діаметр дроту з ізоляцією:

$$d_u=0.04+0.008=0.048 \text{ мм}.$$

Тоді остаточно маємо:

$$t=0.048+0.012=0.06 \text{ мм},$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$w = \frac{330 \cdot 23 \cdot \pi}{0.06 \cdot 360} = 1104 \text{ витка.}$$

Довжина обмотувального проводу

$$L = \frac{R_0 \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho}, \quad (3.3.37)$$

де ρ - питомий опір матеріалу проводу. Для сплаву ПДС-40 $\rho = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

$$L = \frac{2000 \cdot \pi \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 0,42 \cdot 10^{-6}} = 5,984 \text{ м.}$$

Середня довжина одного витка

$$l_{\text{сер}} = \frac{L}{w}, \quad (3.3.38)$$

$$l_{\text{сер}} = 5,984 / 1104 = 5,42 \text{ мм.}$$

Для каркаса приймаємо прямокутний перетин висотою H і шириною b :

$$l_{\text{сер}} = 2 \cdot (H + b).$$

Тоді $H = 2,32 \text{ мм}$ и $b = 0,39 \text{ мм}$.

3.4. Розробка математичної моделі висотоміра

3.4.1. Структурна схема висотоміра й аналіз статичної характеристики

Структурну схему прилада умовно можна представити у вигляді (рис.3.3):

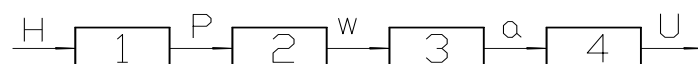


Рис.3.3. Структурна схема приладу [6]

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		36

1 – умовна ланка, що відображає метод виміру і перетворює висоту H в тиск P ;

2 – пружний елемент, що перетворює тиск P в переміщення ω ;

3 – передатньо-множний механізм, що перетворює переміщення ω в кут повороту стрілки α ;

4 – потенціометр, що перетворює кутове переміщення α в напругу U .

Розглянемо характеристики ланок структурної схеми.

Характеристика 1-ої ланки має вигляд, відповідно до формули (3.1.9)

$$P = P_0 \cdot \left(1 + \frac{\beta \cdot H}{T_0} \right)^{-\frac{g_c}{\beta \cdot R_{y0}}}$$

Характеристика 2-ої ланки, згідно (3.3.2)

$$\frac{P \cdot R^4}{E \cdot h^4} = a \cdot \frac{\omega}{h} + b \cdot \frac{\omega^3}{h^3}$$

Для одержання рівномірної шкали блок анероїдних коробок повинен мати лінійну характеристику по висоті, тобто статичне рівняння 1-ої і 2-ої ланки має вигляд:

$$\omega = C \cdot H$$

де C – чутливість анероїдної коробки по висоті.

Для спрощення приймемо, що передатнє відношення 3-ої ланки постійно і, отже, характеристика його буде мати вигляд:

$$\alpha = i \cdot \omega$$

де i – передатнє відношення передатньо-множного механізму.

Тоді статична характеристика приладу в цілому буде мати вигляд:

$$\alpha = i \cdot C \cdot H, \quad (3.4.1)$$

тобто буде лінійною. Коефіцієнт C ми можемо знайти, вирішивши спільно рівняння (3.1.9) і (3.3.2), виразивши функцію $\omega = f(H)$. Коефіцієнт при H и буде виражати чутливість анероїдної коробки по висоті C .

З огляду на те, що при зміні висоти на 500 м стрілка приладу робить поворот на 330° , визначимо передатнє відношення приладу K :

$$K = \frac{\alpha}{H} = i \cdot C, \quad (3.4.2)$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		37

$$K = \frac{330}{500} = 0.66 \frac{\text{град}}{\text{м}} = 1.152 \cdot 10^{-2} \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

Статична характеристика розроблювального приладу лінійна. Це дозволяє використовувати рівномірну шкалу, що легше і зручніше у виготовленні. Даний вид шкали може бути від градуйований як експериментальним, так і аналітичним методом. Рівномірна шкала полегшує візуальне знімання інформації.

Лінійна залежність між кутом повороту вихідної осі зі стрілкою від висоти спрощує конструкцію застосовуваного потенціометра.

3.4.2. Розрахунок динамічної характеристики приладу

Чутливий елемент (блок анероїдних коробок) перетворює вимірювану величину (тиск) у рушійну силу згідно формули:

$$F_{руш} = F_{эф} \cdot P, \quad (3.4.3)$$

де $F_{эф}$ – ефективна площа мембрани.

При статичному режимі виміру, коли $\omega = const$ і $\alpha = const$, рушійна сила врівноважується протидіючою силою, що розвивається анероїдним блоком. Ця сила, називається пружною, пропорційна переміщенню рухливої системи:

$$F_{пр} = C_{пр} \cdot \omega, \quad (3.4.4)$$

де $C_{пр}$ – коефіцієнт твердості анероїдного блоку.

При такому режимі виміру кутова рівновага системи:

$$F_{пр} = F_{руш},$$

чи

$$C_{пр} \cdot \omega = F_{эф} \cdot P. \quad (3.4.5)$$

Відкіля стале показання приладу:

$$\alpha = K \cdot \omega = K \cdot \frac{F_{эф} \cdot P}{C_{пр}} = S \cdot P, \quad (3.4.6)$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		38

де $S = K \cdot \frac{F_{ef}}{C_{np}}$ – чутливість приладу по тиску.

При іншому, динамічному режимі роботи рушійна сила врівноважується в кожний момент часу сумою чотирьох протидіючих сил:

- 1) розглянутою вище пружною силою;
- 2) інерційною силою, що розвивається сукупністю всіх рушійних мас і пропорційної прискоренню рухливої системи:

$$F_{in} = m \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2}, \quad (3.4.7)$$

де m – приведена маса рухливої системи;

- 3) демпфіруючою силою, що розвивається демпфером і пропорційна кутовій швидкості рухливої системи:

$$F_{\partial} = K_{\partial} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.4.8)$$

В якості повітряного демпфера служить ЧЕ, який можна розглядати як поршень із площею F , рівній ефективній площі анероїдної коробки;

- 4) силою тертя F_{mp} .

На основі викладеного можна написати умову динамічної рівноваги системи:

$$F_{np} + F_{in} + F_{\partial} + F_{mp} = F_{руш}. \quad (3.4.9)$$

Замінивши сили через відповідні формули, одержимо диференційне рівняння системи у вигляді:

$$C_{np} \cdot \omega + m \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + K_{\partial} \cdot \frac{d\omega}{dt} + F_{mp} = F_{ef} \cdot P. \quad (3.4.10)$$

Щоб визначити динамічну характеристику приладу, необхідно визначити приведену масу, твердість, коефіцієнт демпфірування і силу тертя.

Масу, приведену до твердого центра ЧЕ визначаємо по формулі [7] :

$$m = \sum_{i=1}^r m_i \cdot \left(\frac{d\omega_i}{d\omega} \right)^2 + \sum_{j=1}^n I_j \cdot \left(\frac{d\alpha_j}{d\omega} \right)^2, \quad (3.4.11)$$

де r – число елементів механізму, що рухаються поступально;

n - число елементів механізму, що роблять обертальний рух.

Елементарні маси, до яких прикладені сили інерції – це анероїдний блок і противага (маси яких рівні між собою).

Мембрана виготовлена з бронзи БрБ2, питома вага якої $\rho = 80400 \text{ Н} / \text{м}^3$.

Орієнтовна вага блоку анероїдних коробок:

$$\begin{aligned} Q_{a.б.} &= 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 6 \cdot h \cdot \rho = \\ &= 12 \cdot \pi \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0.066 \cdot 10^{-3} \cdot 80400 = 0.125 \text{ Н} \end{aligned}$$

З огляду на вагу проміжних трубок, приймаємо:

$$Q_{a.б.} = 0.155 \text{ Н}.$$

Отже, маса анероїдного блоку і противаги буде дорівнювати:

$$m_{a.б.} = m_{np} = 0.0158 \text{ кг}.$$

Джерелами елементарних моментів інерції будуть зубчатий сектор, вісь і деталі на осі стрижня.

Тому що зубчатий сектор являє собою складну фігуру, то його момент інерції будемо вважати приблизно рівним:

$$I_{з.с.} = 8.2 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Для спрощення розрахунків моменту інерції вісь передатного механізму розбиваємо на три частини: циліндричну, напівциліндричну і деталі на осі. Скориставшись готовими формулами будемо вважати, що

$$I_{в.п.м.} = 9.7 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Тому що зубчатий сектор знаходиться на осі множного механізму, то сумарний момент інерції

$$\begin{aligned} I_{м.м.} &= I_{з.с.} + I_{в.п.м.} = 8.2 \cdot 10^{-8} + 9.7 \cdot 10^{-9} = \\ &= 9.2 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \end{aligned}$$

момент інерції стрілки: $I_c = 1.4 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Передатне відношення між віссю стрілки і переміщенням твердого центра

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		40

$$\frac{d\alpha_{cmp}}{d\omega} = \frac{d\left(\arcsin \frac{\omega}{d} \cdot i_{mp.c.}\right)}{d\omega} = \frac{1}{d \cdot \sqrt{1 - \frac{\omega}{d}}} \cdot i_{mp.c.} \frac{\omega_0}{0} =$$

$$= \frac{10^3}{6 \cdot \sqrt{1 - 0.5}} \cdot 11 - \frac{10^3}{6} \cdot 11 = 759.4 \text{ рад/м}$$

Передатне відношення між переміщенням твердого центра і поворотом осі передатнього механізму

$$\frac{d\alpha_{n.m.}}{d\omega} = \frac{d\left(\arcsin \frac{\omega}{d}\right)}{d\omega} = \frac{1}{d \cdot \sqrt{1 - \frac{\omega}{d}}} \frac{\omega_0}{0} =$$

$$= \frac{10^3}{6 \cdot \sqrt{1 - 0.5}} - \frac{10^3}{6} = 69 \text{ рад/м}$$

Передатне відношення між переміщенням протизаги анероїдного блоку і переміщенням твердого центра дорівнює 1.

Остаточно приведена маса буде дорівнювати:

$$m = 0.0158 \cdot 1 + 0.0158 \cdot 1 + 9.2 \cdot 10^{-8} \cdot 69 +$$

$$+ 1.4 \cdot 10^{-9} \cdot 759.4 = 0.0316 \text{ кг}$$

Твердість C_{np} пружного ЧЕ визначається по формулі [1]:

$$C_{np} = \frac{P \cdot R}{E \cdot \omega_0} \cdot \left(\frac{R}{h}\right)^3, \quad (3.4.12)$$

де R – радіус мембрани, $R \approx 25 \text{ мм}$;

h - товщина матеріалу мембрани, $h = 0.066 \text{ мм}$;

E - модуль пружності матеріалу мембрани, $E = 1.33 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

ω_0 - максимальний прогин однієї мембрани, $\omega_0 = 0.5 \text{ мм}$.

$$C_{np} = \frac{4344.462 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{1.33 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{25 \cdot 10^{-3}}{0.066 \cdot 10^{-3}}\right)^2 = 88.765$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Коефіцієнт демпфірування визначимо по формулі:

$$K_{\partial} = \frac{F_{ef}^2}{K_{vit}}, \quad (3.4.13)$$

де K_{vit} – коефіцієнт витікання

$$K_{vit} = \frac{1}{128} \cdot \frac{\pi \cdot d_k^4}{\mu \cdot l_k}, \quad (3.4.14)$$

де d_k і l_k – діаметр і довжина капіляра в м, через який відбувається витікання повітря з демпфера, $d_k=0.02$ м і $l_k=1$ м ;

μ - в'язкість повітря, $\mu = 0.0182$ МПа·с.

$$K_{vit} = \frac{1}{128} \cdot \frac{\pi \cdot 0.02^4}{0.0182 \cdot 1} = 2.16 \cdot 10^{-7}.$$

Тоді

$$K_{\partial} = \frac{(811.6 \cdot 10^{-6})^2}{2.16 \cdot 10^{-7}} = 3.05 \frac{H \cdot c}{m}.$$

Визначимо силу тертя, приведену до твердого центра блоку анероїдних коробок.

Момент тертя, приведений до осі передатного механізму

$$M_{tp} = M_{tp1} + M_{tp2} \cdot i_{tp.c.}, \quad (3.4.15)$$

де M_{tp1} – момент тертя в опорах осі передавального механізму,

$$M_{tp1} = 9.144 \cdot 10^{-3} H \cdot мм;$$

M_{tp2} - момент тертя в опорі на центрах,

$$M_{tp2} = 4.612 \cdot 10^{-2} H \cdot мм.$$

Остаточно маємо

$$\begin{aligned} M_{tp} &= 9.144 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} + 4.612 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} \cdot 11 = \\ &= 5.16 \cdot 10^{-4} H \cdot м \end{aligned}$$

Цей момент передається через плече d , рівне $6 \cdot 10^{-3}$ м. Тому сила тертя, приведена до твердого центра блоку анероїдних коробок буде дорівнювати:

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		42

$$F_{mp} = \frac{M_{mp}}{d} = \frac{5.16 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-3}} = 8.6 \cdot 10^{-2} H$$

Остаточно диференціальне рівняння буде мати вигляд:

$$0.0316 \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + 3.05 \cdot \frac{d\omega}{dt} + 88.765 \cdot \omega + 8.6 \cdot 10^{-2} = 811.6 \cdot 10^{-6} \cdot P \quad (3.4.16)$$

Це коливальна ланка, передаточна функція якого має вигляд:

$$W(S) = \frac{K}{T^2 \cdot S^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot S + 1} \quad (3.4.17)$$

Представивши наше рівняння у вигляді:

$$3.36 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 + 3.44 \cdot 10^{-2} \cdot S + 1 = 9.14 \cdot 10^{-6} \cdot P.$$

Тоді коефіцієнт заспокоєння системи:

$$\xi = \frac{3.44 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot T} = \frac{3.44 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \sqrt{3.36 \cdot 10^{-4}}} = 0.938$$

і постійна часу

$$T = \sqrt{3.36 \cdot 10^{-4}} = 0.0183.$$

Остаточно можемо прийняти, що:

$$W(S) = \frac{K}{0.0183^2 \cdot S^2 + 2 \cdot 0.938 \cdot 0.0183 \cdot S + 1}$$

де

$$K = 9.14 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\alpha_{стр. \max}}{\omega} = 9.14 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{5.76}{3 \cdot 10^{-3}} = 1.75 \cdot 10^{-2} \frac{рад}{Па}$$

- передатне відношення приладу по тиску.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		43

3.4.3. Аналіз динамічної характеристики

Динамічна характеристика – це реакція системи на одиничний східчастий вплив.

Динамічна характеристика приладу має вигляд:

$$\alpha(t) = \left(1 - \frac{e^{-\frac{\xi}{T} \cdot t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} \cdot t + \arctg \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) \right) \cdot K \quad (3.4.18)$$

де $\xi = 0.938$; $T = 0.0183$.

По динамічній характеристиці можна визначити час заспокоєння системи. Час, що пройшов з моменту стрибкоподібної зміни висоти, від початку руху рухливої системи висотоміра, до моменту, при якому значення відхиленої величини кута $\alpha(t)$ рухливої системи відрізняється від сталого не більш, ніж на значення припустимої похибки, називається часом заспокоєння $t_{засп}$ [15].

У додатку 1 (див. програму “Визначення характеристик аерогравіметричного висотоміра”) є розрахунок динамічної характеристики. Ми беремо наступні параметри:

$$t_{засп} = 0.12c$$

Стале значення регульованої величини:

$$\alpha_m = 0.25 \cdot 10^{-1} \text{ рад} \text{ відповідає } t_m = 0.02c.$$

Стале значення регульованої величини:

$$\alpha_{cm} = \lim \alpha(t) = 0.250348 \cdot 10^{-1} \text{ рад}.$$

Величина перерегулювання:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{\alpha_m - \alpha_{cm}}{\alpha_{cm}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{0.250085 \cdot 10^{-1} - 0.250348 \cdot 10^{-1}}{0.250348 \cdot 10^{-1}} \cdot 100\% = 0.1\% \end{aligned}$$

Період коливань $T = 0.33 \text{ c}$.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		44

$$\text{Власна частота коливань } \omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 19.04 \text{ c}^{-1}.$$

Число коливань – 1.

Час запізнювання t_3 дорівнює відрізку часу, укладеному між моментом додатка вхідного стрибкоподібного сигналу і моментом часу, при якому вихідна величина стає рівній половині її сталого значення: $t_3 = 0.005 \text{ c}$.

Логарифмічний декремент загасання системи d_c , що характеризує швидкість загасання коливального процесу

$$d_c = \ln \frac{q_{i \max}}{q_{i+1 \max}} = \ln \frac{0.250348 \cdot 10^{-1}}{0.250085 \cdot 10^{-1}} = 1.05 \cdot 10^{-3},$$

де $q_{i \max}$ і $q_{i+1 \max}$ – дві амплітуди поруч розташованих екстремумів кривої перехідного процесу. Чим більше логарифмічний декремент загасання, тим швидше відбувається загасання перехідного процесу.

3.4.4. Аналіз частотних характеристик

Динаміку вимірювальної системи можна оцінити по частотних характеристиках.

Амплітудна фазочастотна характеристика (АФЧХ) має дійсну і уявну частини:

$$W(jn) = X(n) + j \cdot Y(n), \quad (3.4.19)$$

де

$$X(n) = \frac{k \cdot (1 - T^2 \cdot n^2)}{(1 - T^2 \cdot n^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot T^2 \cdot n^2}, \quad (3.4.20)$$

$$Y(n) = \frac{2 \cdot k \cdot \xi \cdot T \cdot n}{(1 - T^2 \cdot n^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot T^2 \cdot n^2}. \quad (3.4.21)$$

По АФЧХ можна судити про стійкість системи.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Критерій Найквіста говорить: замкнута система стійка, якщо АФЧХ розімкнутої системи не охоплює крапку з координатами $(-1; j(0))$ при зміні частоти обертання n від 0 до ∞ [5].

За критерієм Найквіста розглянута система є стійкою.

Амплітудна частотна характеристика це залежність амплітуди коливань стрілки до амплітуди коливань висоти від синусоїдально - змінюючої частоти вхідного сигналу [5]. АЧХ системи має вигляд:

$$K(n) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2 \cdot n^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot T^2 \cdot n^2}}. \quad (3.4.22)$$

АЧХ для конструктора є дуже важливою характеристикою, тому що дозволяє визначити граничну частоту, при якій відношення амплітуд досягає припустимого значення.

Смуга пропущення приладу: $n_{np} = 38 \text{ Гц}$

Максимальне значення відношення амплітуд: $K_{\max} = 1.7554 \cdot 10^{-2}$ на частоті $n_{\max} = 0$.

Фазова частотна характеристика (ФЧХ) відбиває залежність різниці фаз між коливаннями вхідного сигналу і коливаннями стрілки від синусоїдально змінюючої частоти вхідного сигналу [6]

$$\varphi(n) = -\arctg \frac{2 \cdot \xi \cdot T \cdot n}{1 - T^2 \cdot n^2}. \quad (3.4.23)$$

ФЧХ показує, що коливання стрілки відстають від коливань висоти. Величина відставання лежить у межах

Логарифмічною частотною амплітудною характеристикою називається залежність від частоти вхідного сигналу модуля частотної характеристики, зображеної в логарифмічному масштабі:

$$L(n) = 20 \cdot \lg K(n). \quad (3.4.24)$$

Логарифмічною фазо-частотною характеристикою $\varphi(n)$ називається залежність аргументу частотної характеристики від логарифма частоти:

$$\varphi(n) = -\arctg \frac{2 \cdot \xi \cdot T \cdot n}{1 - T^2 \cdot n^2}. \quad (3.4.25)$$

По ЛАФЧХ можна судити про стійкість системи. Під стійкістю розуміють властивість рухливої (вимірювальної) системи приладу повертатися у

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		46

вихідний стан (стан сталої рівноваги) при будь-якому відхиленні від нього після усунення причини, що порушила сталу рівновагу.

Система абсолютно стійка, тому що крапка перетинання ЛАЧХ із віссю абсцис лежить лівіше крапки перетинання ЛФЧХ із горизонталлю, що проходить через 180° .

3.5 Розрахунок похибок

3.5.1 Аналіз методичних похибок

Методичні похибки обумовлені: зміною рельєфу місцевості; зміною тиску в землі після злету; зміною середньої температури стовпа повітря.

Похибка від зміни рельєфу місцевості ΔH_1 :

$$\Delta H_1 = H_m - H_0,$$

де H_m – висота місця над рівнем моря;

H_0 – висота над рівнем моря відносно якої висотомір дає показання.

Похибка ΔH_1 враховується шляхом уведення виправлень у показання висотоміра за допомогою спеціальних географічних карт. Якщо відомі значення тиску в даній місцевості (ці зведення можуть бути отримані по радіо), то корекцію показань можна вести за допомогою кремал'єри. При автоматичному керуванні польотом по заданому маршруті це виправлення можна ввести автоматично. [12]

Похибка (ΔH_2) від зміни початкового тиску в місці, відносно якого відраховується висота

Для розрахунку цієї похибки використовується формула Лапласа

$$H = R \cdot T_{cp} \cdot \ln \frac{p_0}{p_n}.$$

Проводячи розрахунок аналогічно як у формулі одержуємо

$$\Delta H_2 = R \cdot T_{cp} \cdot \ln \frac{p'_0}{p_0},$$

де p'_0 – початкове значення тиску, що відповідають нульовому показанню приладу;

p_0 – фактичне значення тиску в тім місці, відносно якого потрібно виміряти висоту.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Заміняючи

$$p'_0 = p_0 + \Delta p_0,$$

і приймаючи, що практично $\Delta p_0/p_0 \ll 1$, то похибка визначається в такий спосіб

$$\Delta H_2 = R \cdot T_{cp} \cdot \frac{\Delta p_0}{p_0}.$$

Усунення похибки ΔH_2 виробляється шляхом введення виправлення на зміну Δp_0 . Це виправлення вводиться в ручну за допомогою механізму кремал'єри.

Похибка ΔH_3 від зміни середньої температури повітря в порівнянні з її розрахунковим значенням.

Висотомір градирується виходячи зі стандартного закону розподілу температур по висотах.

На деякій висоті фактичні температури на різних широтах, у різний час року і навіть у різний час дня можуть відрізнятися від стандартних, що і викликає похибку ΔH_3 [6]

Вважаючи, що тиск p_0 не змінюється, а фактична середня температура T_{cp} факт відрізняється від розрахункової,

T_{cp} розрах, показання приладу будуть визначатися вираженням

$$H_{np} = R \cdot T_{cp.розрах} \cdot \ln \frac{p_0}{p_n}.$$

Фактична висота буде

$$H = R \cdot T_{cp.факт} \cdot \ln \frac{p_0}{p_n}.$$

Розділимо H_{np} на H :

$$\frac{H_{np}}{H} = \frac{T_{cp.розрах}}{T_{cp.факт}} \quad (3.5.1)$$

звідки

$$H = H_{np} \cdot \frac{T_{cp.факт}}{T_{cp.розрах}} \quad (3.5.2)$$

Замінімо

$$H_{np} = H + \Delta H_3 \quad \text{і} \quad T_{cp.розрах} = T_{cp.факт} + \Delta T,$$

і підставляючи в рівняння (4.1) одержуємо

$$\Delta H_3 = \Delta T \cdot \frac{H}{T_{cp.факт}}. \quad (3.5.3)$$

Оскільки похибка ΔH_3 пропорційна H , вона є мультиплікативною: при $H=0$ і $\Delta H_3=0$.

Для введення виправлень на похибку ΔH_3 необхідно знати фактичну середню температуру. Температуру по висоті H можна вимірювати в польоті, а дані про температуру на землі необхідно одержувати по радіо.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		48

Для забезпечення розрахунків штурман користується спеціальною аеронавігаційною лінійкою, побудованої для логарифма

$$\text{вираження(10.2): } \lg = \lg H_{np} + \lg T_{cp.факт} - \lg T_{cp.розрах}.$$

Розрахункове значення температури визначаємо по формулі

3.5.2 Аналіз інструментальних похибок

До основних інструментальних похибок барометричного висотоміра відносять:

- 1) шкалова похибка;
- 2) похибка, викликувані тертям;
- 3) похибки, викликувані невірноваженістю деталей передаточно-множувального механізму;
- 4) температурні похибки;
- 5) похибки від гістерезису анероїда;
- 6) похибка від люфтів в опорах і шарнірах;
- 7) похибка від електричного перетворювача.

Шкалові похибки ΔH_4

Шкалові похибки визначаються, насамперед, точністю расцеховки шкали і точністю звіту, але їхнє значення невелике і ними зневажають.

Похибки, викликувані тертям ΔH_5

Похибки, викликувані тертям, є головним джерелом похибки приладу.

Похибки приладу (у м), викликана тертям визначаються по формулі:

$$\Delta H_5 = 0.735 \cdot \frac{\Delta p_{mp}}{\xi_n} = 0.735 \cdot \frac{f'_{mp}}{\xi_n \cdot F_{ta}} \quad (3.5.4)$$

де $\Delta p_{тр}$ – зміна тиску, необхідне для подолання тертя, (Н/см²)
 ξ_n – вертикальний барометричний градієнт, дорівнює зміні атмосферного тиску, (мм рт ст/м);
 $f'_{тр}$ – приведена до чуттєвого елемента сила тертя, (Н);
 $F_{эф}$ – ефективна площа анероїда, (Н).

Підставляючи в рівняння дані, розраховані по формулах і приймаючи по таблицях [9] значення вертикального барометричного градієнта $\xi_n = 6.2 \cdot 10^{-2}$ одержуємо

$$\Delta H_5 = \frac{0.735 \cdot 5.3}{6.2 \cdot 10^{-2} \cdot 7.4} = 1.4 м$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Похибки, викликана невірноваженістю деталей передаточно-множувального механізму

Похибка ΔH_6 викликувані невірноваженістю деталей передаточно -множувального механізму виявляються, насамперед при прискореному русі об'єкта. Їхня величина залежить від значення прискорення і міри невірноваженості деталі – при поступальному русі чи моменту інерції – при обертальному русі деталі. У висотомірі похибки, що представляється, можуть виникати за рахунок невірноваженого анероїдного блоку і зубчатого сектора. Для усунення цієї похибки застосовується противага.

Температурні похибки

Ці похибки виникають при температурах, відмінних від тієї, при якій виробляється тарировка приладу. Причинами інструментальних температурних похибок є:

- зміна лінійних розмірів деталей механізму;
- зміна тиску усередині анероїда при неточній його відкачці;
- зміна модуля пружності матеріалу, з якого виготовлений анероїд.

Зміна лінійних розмірів деталей практично не впливає на показання приладу і їм можна зневажити, тому що тяга, що з'єднує анероїд з віссю передаточно – множувального механізму й основних його елементів виготовлені з матеріалу з мало відрізняється температурним коефіцієнтом лінійного розширення. Вплив внутрішнього тиску анероїда може бути враховане в такий спосіб:

якщо відкачка анероїда була проведена при температурі 293 °К, причому тиск усередині анероїда після його відкачки виявився рівним $p_{ост}$, то зміна залишкового тиску буде найбільшим при $t = 213$ °К [9],

$$\Delta p_{зал} = p_{зал} \cdot \frac{213 - 293}{213} = -0.293 \cdot p_{зал}.$$

Знак “-” показує, що тиск усередині анероїда зі зниженням температури зменшується, а це викликає зменшення показань висотоміра на величину

$$\Delta H_7 = \frac{\Delta p_{зал}}{\xi_n} = \frac{p_{зал} \cdot (1 - 293)}{273 \cdot \xi_n} \quad (3.5.5)$$

Приймаючи, що залишковий тиск дорівнює 0.1 мм рт. ст.[42], а значення вертикального барометричного градієнта для

висоти 5000 м $\xi_n = 6.2 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст./м, одержуємо

$$\Delta H_7 = \frac{0.1 \cdot (213 - 293)}{273 \cdot 6.2 \cdot 10^{-2}} = 0.35 \text{ м}.$$

Зміна модуля пружності матеріалу анероїда найбільше помітно впливає на показання висотоміра при зміні температури. Температурна похибка, виражена в одиницях тиску, буде визначатися по формулі

$$\Delta p = -p_n \cdot \lambda \cdot \Delta t.$$

Щоб виразити температурну похибку в одиницях висоти, дорівняємо

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		50

$$\Delta p = \Delta H_7 \cdot \xi_n,$$

$$\Delta H_8 \cdot \xi_n = -p_n \cdot \lambda \cdot \Delta t \quad (3.5.6)$$

тоді

Виразивши, ξ_n по формулі

$$\xi_n = - \frac{\left(1 - \tau \cdot \frac{H}{T_0}\right)^{\frac{1}{\tau \cdot R} - 1} \cdot p_0}{R \cdot T_0};$$

а p_n по формулі

$$p_n = p_0 \cdot \left(1 - \tau \cdot \frac{H}{T_0}\right)^{\frac{1}{\nu \cdot K}},$$

і підставляючи ці формули в рівняння (6) одержуємо

$$-\Delta H_8 \cdot p_0 \cdot \frac{\left(1 - \frac{\tau \cdot H}{T_0}\right)^{\frac{1}{\tau \cdot K} - 1}}{R \cdot T_0} = -p_0 \cdot \left(1 - \frac{\tau \cdot H}{T_0}\right)^{\frac{1}{\nu \cdot R}} \cdot \lambda \cdot \Delta t,$$

звідки

$$\Delta H_8 = \lambda \cdot R \cdot T_0 \cdot \Delta t - \lambda \cdot R \cdot \tau \cdot H \cdot \Delta t \quad (3.5.7)$$

Похибку, викликану зміною модуля пружності матеріалу анероїда, можна компенсувати за допомогою компенсаторів першого і другого роду.

Похибки від недосконалості чуттєвого елемента (анероїда)

Похибки, викликані недосконалістю чуттєвого елемента, зв'язані: наближеним розрахунком характеристики анероїда, гістерезисом і пружною післядією анероїдної коробки.

Наближений метод розрахунку характеристики зв'язаний з розбіжністю дійсної характеристики і її значенням, прийнятим для розрахунків.

Похибка, викликана наближенням у діапазоні 3000÷5000м, не перевищує 0.1%.

Похибка, викликана гістерезисом і пружною післядією чуттєвого елемента, при його гарній термообробці не повинне перевищувати 0.05%.

Сумарна похибка не повинна перевищувати 1.5м на висоті 3000м.

Похибки від люфтів в опорах і шарнірах

Похибки від люфтів в опорах і шарнірах зв'язана з неточністю виготовлення деталей і має місце у всіх приладах.

Її можна усунути, застосовуючи на вихідній осі волосок, що ліквідує люфти.

Похибки від електричного перетворювача

Похибка від електричного перетворювача складається з двох доданків: похибки від навантаження, що для висоти 3000 м дасть 2 м і виткової похибки – 0.6 м.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		51

Сумарна похибка перетворювача для висоти 3000 м
буде –2.6 м.

Крім зазначених похибок, потенціометричний перетворювач вносить великі похибки, викликані тертям движка потенціометра об каркас. Ця похибка розрахована разом з похибками викликаними тертям.

Таблиця 3.2.

АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ ПОХИБОК

№	Причини похибок	Формули визначення похибок	Чісельне значення	Методи зменшення похибок
1	2	3	4	5
1	Змінення рельєфу місцевості	$\Delta H_1 = H_m - H_0$	Залежить від рельєфу місцевості, повністю компенсується	1. Корекція по географічним картам. 2. Корекція по даним про тиск на Землі отриманих по радіо
2	Зміна початкового тиску на Землі	$\Delta H_2 = R \cdot T_{cp} \cdot \frac{\Delta p_0}{p_0}$	Залежить від зміни тиску повністю компенсується	За допомогою пристрою кремал'єри

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5
3	Змінення середньої температури воздуха	$\Delta H_3 = \frac{\Delta T}{T_{\text{ср. факт}}} \cdot H$	Залежить від висоти і змінення температури. Компенсується	Вимірюється температура на висоті Н, по радіо передаються дані температури у поверхні Землі; поправка визначаємо по аеронавігаційній лінійці
4	Шкалові похибки	-	Пренебрігаємо	Точна розціновка шкали; уважний та точний звіт показань
5	Тертя	$\Delta H_5 = \frac{0.135 \cdot f_{\text{тр}}}{\xi_n \cdot F_{\text{еф}}}$	0.64м	Збільшення ефективної площі анероїда; зменшення тертя у підшипниках
6	Неврівноваженість деталей передаточно-множувального механізму	-	Залежить від прискорення	Точна балансировка рухливих деталей

Продовження табл. 3.2.				
1	2	3	4	5
7	Змінення ліній-них розмірів деталей під впливом температури	-	Пренебрігає-мо	Передаточно-множувальний механізм та ЧЕ з матеріалу коефіцієнти лінійного розширення яких мало відрізняються
8	Неповна відкачка анероїда	$\Delta H_7 = \frac{P_{зал} \cdot (1 - 293)}{273 \cdot \xi_n}$	0.35м	Точна відкачка анероїда
9	Вимірювання модуля пружності матеріала анероїда	$\Delta H_8 = \lambda \cdot R \cdot \Delta t (T_0 - \tau \cdot H)$	Залежить від температури та висоти	Використання компенсаторів
10	Недосконалення чутливого елемента	Визначається експериментально	0.15% 1.5м для 1000м 0.75 для 500м	Точна термообробка анероїда; точне визначення розрахункової характеристики ЧЕ
11	Люфти в опорах, шарнірах та зубчастих парах	Визначається експериментально	Компенсують-ся	Застосування на вихідній вісі волоска
12	Електричний перетворювач	-	0.26% 2.6м для 1000м 1.3 м-900м	Підбірка відповідних матеріалів та розмірів
Сумарна похибка висотоміра без врахування потенціометричного перетворювача			7.4м для 1000м 6.8м для 500м	
Сумарна похибка висотоміра			10м для 1000м 8м для 500м	

3.5.3 Визначення сумарної динамічної похибки приладу

Початковим рівнянням для розрахунку динаміки є диференціальне рівняння движка системи

$$mx + B\dot{x} + Cx \pm F_{\text{тер}} = f(t) \quad (3.6.8)$$

де m -маса приведена до жорсткого центру чутливого елементу;

B -приведений коефіцієнт демпфування;

C -приведений коефіцієнт жорсткості;

$F_{\text{тер}}$ -приведена сила тертя

$f(t)$ -сила діюча на чутливий елемент.

У розглянутому випадку приймаємо, що сила діюча на анероїд є постійною $f(t)=F$, а демпфування пропорційне швидкості відсутнє [6].

Методи дослідження динамічних характеристик наведені у багатьох джерелах. Загальні принципи викладені в [] та інших. Методика дослідження динаміки упругих чутливих елементів викладена в []. У неї передбачається дослідження упругих елементів по прикладу з еквівалентними електричними схемами. Але у всіх цих методиках передбачається, що демпфування пропорційне \dot{x} , що для приведеного приладу невірно. У приладах цього типу заспокоєння коливань відбувається за рахунок тертя. Методика розрахунку переходного процесу для приладів у котрих відсутнє загасання пропорційне швидкості приведено у [].

Враховуючі наведені фактори записуємо рівняння (4.8) у вигляді

$$m \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} \pm F_{\text{тер}} = F \quad (3.6.9)$$

Щоб визначити час переходного процесу необхідно визначити приведену до чутливого елемента масу, жорсткість і силу тертя.

Масу, приведену до твердого центра ЧЭ, визначаємо по формулі (8.7

$$m = \sum_{i=1}^{rr} m_i \left(\frac{d\omega_i}{d\omega} \right)^2 + \sum_{j=1}^n J_j \left(\frac{d\alpha_j}{d\omega} \right)^2, \quad (3.6.10)$$

де

m_i – елементарна маса;

J_j – елементарний момент інерції;

$d\omega$ - лінійне зміщення точки приведення;

$d\omega_i$ - кутове переміщення точки прикладення i -ї сили;

$d\alpha_j$ - кутове переміщення точки прикладення j -го моменту;

$\frac{d\omega_i}{d\omega}$ - предатне відношення від точки приведення до точки прикладення i -ї сили;

$\frac{d\varphi_j}{d\omega}$ – передатне відношення від точки приведення до точки j-го моменту.

Елементарні маси, до яких прикладені сили інерції – це анероїдний блок і противага анероїдного блоку (маси, яких рівні між собою).

Орієнтована вага блоку анероїдних коробок

$$Q_a = Q_{np} = 1.85 \cdot 10^{-1} \text{ Н.70}$$

Маса буде дорівнювати: $m_a = m_{np} = 1.8 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$

Джерелом елементарних моментів інерції буде зубчатий сектор, вісь та деталі на вісі передаточно-множувального механізму, вісь та деталі на вісі стрілки.

Розрахунок моменту інерції зубчатого сектора.

Враховуючі, що зубчатий сектор представляє собою складну фігуру, для полегшення розрахунків розраховуємо його елементарні фігури. Для розрахунків використовуємо формулу

$$J = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 \quad (3.6.11)$$

приймаємо для спрощення розрахунків, що зубцуватий сектор представляє собою плоску фігуру з рівно розділеної масою, а противага зубчатого сектора точечну масу росташовану на відстані $r = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ від повороту та приймаючи дані

$$J_{з.с.} = 8.23 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Розрахунок моментів інерції від передатно-множувального механізму.

Для спрощення розрахунків вісь разбиваємо на три частини: циліндричну часть, напівциліндричну та деталей на вісі. Після такого розположення використовуємо готові формули та отримуємо

$$J_{оп.м} = 9.7 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Тому що зубцюватий сектор знаходиться на осі множного механізму, то сумарний момент інерції

$$J_{м.м} = J_{з.с.} + J_{оп.м} = 6.2 \cdot 10^{-8} + 9.7 \cdot 10^{-9} = 9.2 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ,$$

момент інерції стрілки

$$J_c = 1.4 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Передатне відношення між віссю стрілки і переміщенням твердого центра

$$\frac{d\alpha_{cmp}}{d\omega} = \frac{d\left(\arcsin \frac{\omega}{d} \cdot i_{mp.c}\right)}{d\omega} = \frac{1}{d\sqrt{1-\frac{\omega^2}{d^2}}} \cdot i_{mp.c} = \frac{10^3}{6 \cdot \sqrt{1-0.5}} \cdot 11 - \frac{10^3}{6} \cdot 11 = 759.4 \text{ рад/м.}$$

Передатне відношення між переміщенням твердого центра і поворотом осі передавального механізму

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		56

$$\frac{d\varphi_1}{d\omega} = \frac{z_1}{z} \cdot \frac{1}{a \cdot \cos \alpha} = 3620 \text{ м}^{-1}.$$

Передатне відношення між вісю передаточно-множувального механізму і переміщенням жорсткого центра

$$\frac{d\varphi_2}{d\omega} = \frac{1}{a \cdot \cos \alpha} = 362 \text{ м}^{-1}.$$

Передатне відношення між переміщенням противаги анероїдного блоку та переміщенням жорсткого центра

$$\frac{d\omega_1}{d\omega} = 1.$$

Остаточно приведена маса буде дорівнювати

$$m = 1.8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 9.2 \cdot 10^{-8} \cdot 362^2 + 1.4 \cdot 10^{-9} \cdot 3620 = 6.7 \cdot 10^{-1} \text{ кг}.$$

Жорсткість C_y пружного ЧЭ визначається по формулі (4.1)

$$C_y = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta\omega} \right) = \frac{dF}{d\omega}$$

Для розрахунків приймаємо, що характеристика пружного елемента лінійна та її жорсткість дорівнює середній жорсткості прогину $0.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$$C_y = \frac{F_{ef} \cdot \Delta P_{lin}}{\omega_{max}} = \frac{7.4 \cdot 10^{-4} \cdot 11457}{3 \cdot 10^{-3}} = 2826.1 \text{ Н / м}$$

Приведена сила тертя: $F_{mp} = 5.3 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$

Максимальна сила діюча на чутливий елемент

$$F = F_{ef} \cdot \Delta P_{max} = 7.4 \cdot 10^{-4} \cdot 11457 = 8.5 \text{ Н}$$

Частота власних коливань

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{2826}{6.7 \cdot 10^{-2}}} = 205 \text{ с}^{-1}$$

Зона затухання

$$\Delta\omega_{mp} = \frac{F_{mp}}{c} = \frac{8.5}{2826} = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Коливання будуть гаснути в арифметичній похибці на величину $4 \cdot \Delta\omega_{np}$ на одне коливання. Перехідний процес закінчується коли амплітуда коливань стає рівною зоні затухання $\Delta\omega_{np}$

Зона затухання становить

$$\Delta = \frac{\Delta\omega_{np}}{\omega} \cdot 100\% = \frac{1.8 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0.6\%$$

від максимального переміщення пружного елемента. За один період коливань амплітуду зменшуємо на $4 \cdot 0.6 = 2.4\%$, тоді повне число коливань буде $n = 42$.

Так як частота приватних коливань приладу $k=205$, то час перехідного процесу $t_{пп} = \frac{42}{205} = 0.2 \text{ с}.$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		57

3.6. Розробка мікропроцесорної системи

Мікропроцесор – це пристрій обробки даних (і керування) із гнучкою логікою роботи, виконане за інтегральною технологією.

МП зробили революцію у вимірювальній техніці. Це зв'язано з поруч їхніх особливостей, основними з яких є програмування і відносно велика обчислювальна потужність, що сполучається з високою надійністю, малими габаритами, масою, енергоспоживанням і вартістю.

Завдяки малогабаритності, мікро потужності, високої надійності і низкою вартості мікропроцесор став елементом універсального застосування. Його чудові властивості створили передумови для вбудовування обчислювальних систем у різних пристроях.

Вбудована у вимірювальний прилад мікропроцесорна система розширює його можливості, додає йому нові якості: багатофункціональність, різке підвищення потужності, спрощення і полегшення керування, функціональну гнучкість, можливість здійснення самокалібрування, підвищену надійність і економічність мініатюрності конструкції, а також дозволяє автоматизувати статичну обробку результатів виміру. З'явилися цілком автоматизовані, програмно-керовані прилади, що радикально підвищують продуктивність праці і що дозволяють вирішувати задачі, що раніше взагалі не ставилися. Ці прилади називають “інтелектуальними”. Саме на їхнє створення орієнтують сьогодні майбутніх фахівців приладобудування [25].

Численні задачі, розв'язувані за допомогою МП систем, на сьогоднішній день уже важко піддаються перерахуванню. Часто їх підрозділяють по визначених класах задач керування:

- програмно-логічне керування;
- стабілізація (орієнтація, спостереження);
- виведення на режим (оптимальне керування статикою, екстремальне керування, оптимальна швидкодія);
- програмне керування;
- адаптація і т.д.

Головна особливість роботи вбудованої системи в будь-якому режимі – це робота в реальному часі з джерелами і приймачами інформації, представленої в цифровій формі.

Функції ПЕОМ в розроблювальному приладі

Вбудована у прилад ПЕОМ може взяти на себе цілий ряд функцій, таких як:

- керування режимом вимірів;
- підвищення точності виміру;
- обробка результатів вимірів по програмі;
- стабілізація частоти биття висотоміра з частотною модуляцією;
- статична обробка результатів вимірів;
- інтерфейсні функції й ін.

Оскільки аерографіметричний висотомір працює у комплексі з іншими вимірювальними пристроями на борту літака, необхідно розглянути особливості його поєднання з бортовою ПЕОМ і варіант обслуговування за пріоритетами.

У якості персональної електронної обчислювальної машини використовується IBM PC сумісний комп'ютер.

Згідно завдання на дипломний проект у розділі буде розглянуто один з можливих варіантів уводу вимірювальної інформації за допомогою так званої L – плати (продукція фірми L - CARD), найбільш сучасний варіант уводу до бортової ПЕОМ.

Призначення L-плати

L-плата (L-154) є швидкодіючим і надійним пристроєм для введення і висновку аналогової і цифрової інформації в персональних IBM сумісних комп'ютерах.

Плата призначена для перетворення аналогових сигналів у цифрову форму для персональної ЕОМ, а також для введення/висновку цифрових ТТЛ ліній і керування одним вихідним аналоговим каналом (ЦАП).

L – плата дозволяє:

- здійснювати многоканальне введення з аналогових каналів з частотою до 70 кГц;
- здійснювати асинхронне введення з різних аналогових каналів;
- керувати АЦП;
- здійснювати роботу в двох режимах: у програмному режимі й у режимі генерації переривань IRQ;
- керувати цифровими лініями в асинхронному режимі.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Плата L-154 розрахована на стандартну ISA шину IBM сумісних комп'ютерів. Сучасні комп'ютери мають можливість програмно через Setup змінювати параметри ISA шини, роблячи її нестандартної.

На рис.3.4 показана структурна схема L-плати.

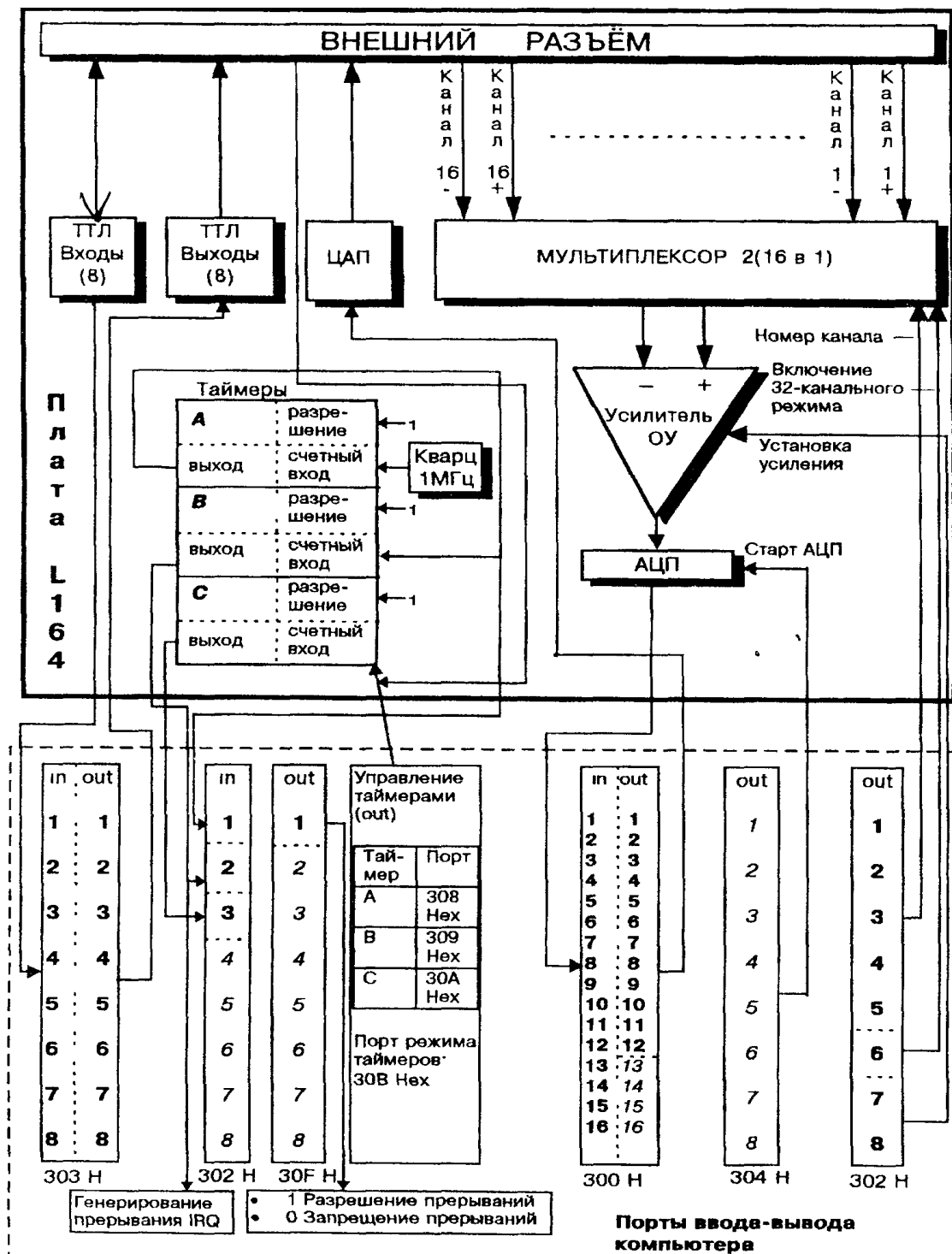


Рис. 3.4. Структурна схема L – плати [15]

Особливості побудови L-плати

На платі L-154 мається один АЦП, на вхід якого за допомогою комутатора може бути поданий один з 16 (32) аналогових каналів із зовнішнього рознімання плати.

Параметри АЦП:

- Число каналів 16 диференціальних
32 із загальною землею
- Розрядність 12 біт
- Час перетворення 1.7 мкс
- Максимальна частота перетворення 70кГц
- Інтегральна нелінійність перетворення + 0.8 МЗР, макс. + 1.2 МЗР
- Диференціальна нелінійність перетворення + 0.5 МЗР, макс + 0.75 МЗР
- Відсутність пропуску кодів гарантовано 12 біт
- Зсув нуля + 0.5 МЗР, макс. + 1 МЗР

ЦАП дозволяє формувати аналоговий сигнал на виході плати за допомогою якого можна керувати виконавчим пристроєм.

Параметри ЦАП:

- Число каналів 1
- Розрядність 12 біт
- Час установлення 10 мкс
- Вихідний діапазон + 5.12 В.

Цифрові входи і виходи

Плата L-154 містить 8 цифрових входних ТТЛ-ліній і 8 вихідних ТЛ-ліній, за допомогою яких можна керувати зовнішніми пристроями, здійснювати цифрову синхронізацію введення і т.п.

- Вхідний порт 8 біт ТТЛШ
- Вихідний порт 8 біт ТТЛШ

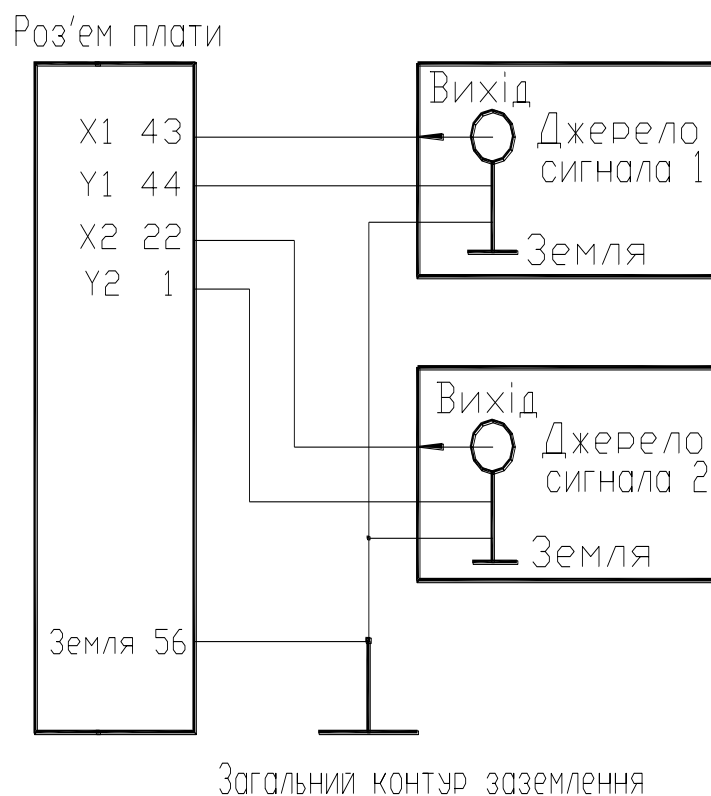


Рис. 3.5. Схема підключення сигналів у диференційному режимі [1]

На приведеній схемі до першого каналу АЦП підключене Джерело сигнала 1, а до другого Джерело 2.

Вхідні канали АЦП захищені від пробою буферними резисторами 1 кОм й вбудованими діодами в аналогових комутаторах. Така схема дозволяє забезпечити захист від перевищення вхідної напруги над напругою харчування на 10В. Тобто при включеному комп'ютері захист працює до $\pm 20\text{В}$, а при виключеному до $\pm 10\text{В}$ [1].

На рис.3.6 зображена схема роз'єму в 16 каналному диференціальному режимі.

Режими вводу

Робота L-плати з аналоговими каналами можлива в наступних режимах:

- однократне асинхронне введення з АЦП (SAMPLE), що здійснює аналого-цифрове перетворення з АЦП, попередньо встановленого за допомогою функції SETCHANNEL. Даною функцією зручно користатися для асинхронного введення, коли не потрібно переустановлювати номер каналу;

- однократне введення з переустановкою каналу АЦП (ADCHAN), що здійснює асинхронне введення з різних каналів АЦП;

- однократне введення послідовності каналів АЦП (KADR), тобто вводиться N_{ch} відліків з каналів АЦП, зазначених у масиві Channels у масив Data;

- одноканальне введення із синхронізацією від таймера (STREAM), коли здійснюється зчитування послідовності відліків із заданого каналу АЦП з інтервалом Rate між відліками.

Запуск АЦП виробляється програмно шляхом запису будь-якого циклу за адресою BASE+4. Після запуску АЦП рівно через 1.7мкс результат перетворення можна буде прочитати за адресою BASE. Для перевірки закінчення циклу перетворення задіяний четвертий біт у порту статусу. Нульовий стан цього біта означає закінчення перетворення [1].

Керування комутатором і підсилювачем

На платі L-154 встановлений 32 каналний комутатор (мультиплексор), за допомогою якого на вхід АЦП подається один з 16 чи 32 аналогових каналів. Після переключення номера каналу в комутаторі не можна відразу давати старт АЦП, необхідно організувати затримку на встановлення аналогового каналу. Ця затримка складає 4 мкс. Для прискорення процесу багатоканального введення можна переустановлювати номер каналу відразу ж після старту АЦП (після старту АЦП спрацьовує внутрішнє ПВЗ, у якому запам'ятовується аналогове значення сигналу на момент старту), не чекаючи завершення перетворення.

Одночасно з номером аналогового каналу здійснюється керування коефіцієнтом підсилення і режимом підключення сигналів. У табл. 3.3 показаний формат номера каналу.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ФОРМАТ НОМЕРА КАНАЛУ

Біт	8	7	6	5	4	3	2	1
Ім'я	U2	U1	M32	C5	C4	C3	C2	31

В поля U2-U1 записується коефіцієнт підсилення каналу. У полі M32 встановлюється біт, відповідальний за режим підключення сигналів. Поля C5-C1 також відповідають номеру каналу. При диференціальному підключенні поле M32 повинне бути дорівнює 0 (відповідно біт C5 номера каналу C5-C1 також повинний бути дорівнювати нулю).

Нижче представлений програмний модуль, що показує приклад установки каналу АЦП, коефіцієнта підсилення і режиму підключення.

Програмний модуль

Установимо перший канал АЦП, включений у диференціальному режимі

```
mov    dx, 302H    ; адреса порту номера каналу
mov    al, 0C0H    ; перший канал АЦП, посилення=1, диф. режим
out    dx, al      ; установимо параметри каналу АЦП
```

```
mov    dx, 303H    ; як затримку на встановлення каналу
in     al, dx       ; зчитуємо цифровий порт
```

; дамо старт АЦП

```
mov    dx, 304H    ;
out    dx, al      ; дамо старт перетворення
```

; почекаємо біта готовності

```
jmp    $+2         ; треба чекати більше 0.1 мкс
```

; дочекаємося завершення циклу перетворення

```

mov    dx, 302H    ; порт із бітом готовності
wb_ready:    ; чекаємо нульового стану на біті готовності
in      al,dx      ;
and     al,8        ;
jnz     wb_ready   ;

```

; читання результату АЦП

```

mov    dx, 300H    ; адреса читання коду з АЦП
in      ax, dx      ; зчитуємо код з АЦП

```

Робота МПС при рішенні задачі допускового контролю

Відповідно до завдання розглянемо детальніше рішення МПС задачі допускового контролю. У загальному випадку процедура допускового контролю являє собою операцію порівняння контрольованого параметра з вузьким і широким полями допуску і формування судження про перебування контрольованого параметра у допуску.

У даному конкретному випадку ПЕВМ повинна виконати наступну послідовність операцій:

- визначення різниці, перетворених у коди, сигналів вимірювальної інформації з ОТРПС і РТРПС;
- порівняння з вузьким і широким полями допуску;
- формування судження про перебування в допуску [1].

Зробимо висновки до даного розділу:

Застосування МПС в аерогравіметричному висотомірі дозволить:

- запам'ятовувати в пам'яті групу даних і робити статичну обробку результатів вимірів;
- підключати до вимірювальної системи периферійні пристрої (наприклад, друкуючі);
- підвищити продуктивність і автоматизувати процедуру обробки;
- збільшити кількість функцій, виконуваних вимірювальною системою;
- підвищити точність виміру.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

4. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

4.1. Опис об'єкта для технологічного процесу

Для опису технологічної частини проекту як об'єкт візьмемо прилад у цілому. Складальне креслення аерогравіметричного висотоміра представлений у графічній частині дипломного проекту. Опис принципу дії приладу приведено в проектно-конструкторському розділі.

Висотомір виконаний у виді циліндра з відливками для кріплення і має наступні габаритні розміри: діаметр 90 мм і довжину 105 мм. До складу приладу входять три складальні одиниці: потенціометр, блок анероїдних коробок і механізм передатній.

Одним з основних вимог, пропонованих до приладу, є герметичність. Тому в даній частині проекту я і розглядаю контрольне пристосування для перевірки приладу на герметичність.

4.2. Оцінка рівня технологічності конструкції приладу

Технологічність конструкції це така властивість окремих деталей, складальних одиниць і приладів у цілому, при якому для даних умов, масштабу випуску і даних технічних вимог до приладу, забезпечується найбільш раціональне його виготовлення, а також найбільш швидко й економічне освоєння його виробництва [15].

Конструкція буде технологічною, якщо вона має найменшу трудомісткість, самим коротким виробничим циклом, найбільшою уніфікацією і нормалізацією одиниць складання і деталей, можливістю застосування дуже простих і раціональних операцій, а також можливістю автоматизації зборки при маленькій кількості матеріалів і устаткування.

Для виробів типу складальних одиниць задачами відпрацювання на технологічність є: забезпечення технологічності принципової конструктивних схем складальної одиниці; забезпечення технологічної компоновки складальної одиниці; забезпечення раціонального членування на складові частини; використання компенсаторів при

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зборці; забезпечення умов застосування високопродуктивних технологічних процесів зборки, контролю й іспитів; обмеження і скорочення номенклатури матеріалів, використовуваних у складових частинах виробу [6].

Методика відпрацьовування конструкції на технологічність і оцінки рівня технологічності виробів у приладобудуванні розроблена на основі ДСТ 14.201-73.

4.2.1. Визначення основних показників технологічності

Абсолютний техніко-економічний показник трудомісткості виготовлення T_u виражається сумою нормо-годинника, витрачених на виготовлення приладу [21].

$$T_u = \sum_i T_i = 240 \text{ годин}$$

Рівень технологічності конструкції по трудомісткості виготовлення K_T визначається як відношення досягнутої трудомісткості виробу до базового показника трудомісткості виготовлення $T_{б.н.}$ ($T_{б.н.}=290\text{годин}$)

$$K_T = \frac{T_u}{T_{б.н.}} = \frac{240}{290} = 0.83$$

Технологічна собівартість виробу C_u визначається як сума витрат на одиницю виробу [25]

$$C_u = C_m + C_z + C_{ц.р.}$$

де $C_m=100 \text{ грн.}$ – вартість матеріалів, затрачених на виготовлення приладу;

$C_z=350 \text{ грн.}$ - заробітна плата виробничих робітників з нарахуваннями;

$C_{ц.р.}=700 \text{ грн.}$ - цехові накладні витрати.

$$C_u = 100 + 350 + 700 = 1150 \text{ грн.}$$

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівень технологічності конструкції по технологічній собівартості визначається як відношення досягнутої собівартості виробу C_u технологічної собівартості базового виробу $C_{б.н.}$ ($C_{б.н.}=1500$ грн.) [5].

$$K_c = \frac{C_u}{C_{б.н.}} = \frac{1150}{1500} = 0.77.$$

4.2.2. Технічні показники уніфікації конструкції

Коефіцієнт уніфікації виробу K_y визначається по формулі [25]

$$K_y = \frac{E_y + D_y}{E + D}$$

де E_y – число уніфікованих складальних одиниць у виробі ($E_y=2$);

D_y - число уніфікованих деталей ($D_y=29$);

E - кількість складальних одиниць у приладі ($E=3$);

D - кількість деталей, що є складовими частинами виробу ($D=42$).

$$K_y = \frac{2 + 29}{3 + 42} = 0.69.$$

Коефіцієнт уніфікації складальних одиниць $K_{y.c.}$ визначається як відношення кількості уніфікованих складальних одиниць до загального числа складальних одиниць у виробі [5]:

$$K_{y.c.} = \frac{E_y}{E} = \frac{2}{3} = 0.67$$

Коефіцієнт уніфікації деталей виробу $K_{y.d.}$ це відношення кількості уніфікованих деталей до загального числа деталей у приладі, крім кріпильного

$$K_{y.d.} = \frac{D_y}{D} = \frac{29}{42} = 0.69$$

Коефіцієнт повторюваності $K_{пов}$ визначається по формулі:

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

$$K_{нов} = 1 - \frac{Q}{E + Д}$$

де Q – число найменувань складових частин, $Q=42$;
 $E+Д$ - загальне число складових частин у виробі.

$$K_{нов} = 1 - \frac{42}{3 + 42} = 0.07.$$

4.2.3. Комплексний показник технологічності Виробу

Комплексні показники технологічності виробу на відміну від часток характеризують не окремі приватні ознаки технологічності, а визначену групу ознак технологічності конструкції [19].

Технологічність конструкції виробу характеризується одним комплексним або декількома показниками, що узагальнюють групи приватних чи показників виражають різні види технологічності конструкції приладу.

Методика визначення комплексних показників враховує різну економічну ефективність вхідних приватних показників шляхом введення коефіцієнтів економічної ефективності K , часток показників технологічності конструкції виробу. Цей коефіцієнт доцільно обмежувати межами $0 < K < 1$. При цьому рекомендуються коефіцієнти економічної ефективності визначати з умови

$$\sum_i K_{\mathcal{E}i} = 1.$$

Комплексний показник технологічності визначається по формулі [25]

$$K = \frac{K_1 \cdot K_{1\mathcal{E}} + K_2 \cdot K_{2\mathcal{E}} + K_3 \cdot K_{3\mathcal{E}} + \dots + K_n \cdot K_{n\mathcal{E}}}{K_{1\mathcal{E}} + K_{2\mathcal{E}} + K_{3\mathcal{E}} + \dots + K_{n\mathcal{E}}} =$$

$$= \frac{\sum_i^n K_i \cdot K_{i\mathcal{E}}}{\sum_i^n K_{i\mathcal{E}}}$$

де K_i – приватний показник технологічності;

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$K_{i\theta}$ - коефіцієнт економічної еквівалентності i -го приватного показника.

Технологічність даного приладу оцінюється чотирма приватними коефіцієнтами технологічності: $K_1=K_m=0.83$, $K_2=K_c=0.77$, $K_3=K_y=0.69$, $K_4=K_{y.c.}=0.67$, $K_5=K_{y.d.}=0.69$, $K_6=K_{nov}=0.07$.

По типовому представленню даного виробу встановлене співвідношення показників економічності : $K_{1E}=0.35$, $K_{2E}=0.21$, $K_{3E}=0.12$, $K_{4E}=0.06$, $K_{5E}=0.16$, $K_{6E}=0.1$.

Тоді

$$K = \frac{0.83 \cdot 0.35 + 0.77 \cdot 0.21 + 0.69 \cdot 0.12}{0.35 + 0.21 + 0.12 + 0.06 + 0.16 + 0.1} + \frac{0.67 \cdot 0.06 + 0.69 \cdot 0.16 + 0.07 \cdot 0.1}{0.35 + 0.21 + 0.12 + 0.06 + 0.16 + 0.1} = 0.69$$

Так як комплексний показник $K=0.69 > 0.5$ технологічна конструкція виробу технологічна і вироб можна запускати на виробництво.

4.3. Розрахунок точності зборки

Розрахунок точності зборки полягає у визначенні фізичної взаємозамінності чи приладу складальної одиниці, а це значить одержати необхідну величину вихідного фізичного параметра в заданих межах у всієї партії приладів, що збираються. Вихідний фізичний параметр приладу є похідним від цілого ряду первинних параметрів і характеристик, з якими він знаходиться у визначеній функціональній залежності. Тому фізичну взаємозамінність часто називають також функціональною [15].

Визначимо похибку вихідного параметра – напруги лінійного потенціометра з кутовим переміщенням движка.

Вихідна напруга визначається вираженням

$$U_{вих} = U_0 \cdot \frac{\varphi \cdot N_{разр}}{\varphi_0 \cdot N}$$

де U_0 – вхідна напруга живлення, В;

φ_0 - максимальний кут повороту движка;

$N_{разр}$ - розрахункова кількість витків потенціометра;

N - дійсне число витків обмотки.

$$\varphi_{про} = 330^\circ = 5.76 \text{ рад}; N_{расч} = 1104 \text{ витка.}$$

$$U_{вих} = U_0 \cdot 191.68 \cdot \frac{\varphi}{N}$$

Похибка вихідної напруги викликана відхиленням вихідних параметрів при виготовленні потенціометра. До таких параметрів відносяться:

$$U_0 = (24 \pm 0.2) \text{ В} \quad N = (1104 \pm 2) \text{ витків}$$

Тому що зміна параметрів у межах допусків є випадковим, то значення похибки вихідної напруги:

$$\delta U_{вих} = \sqrt{\left(\left. \frac{\partial U_{вих}}{\partial U_0} \right|_{\bar{U}_0} \cdot \delta_{u_0} \cdot k_{U_0} \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial U_{вих}}{\partial N} \right|_{\bar{N}} \cdot \delta_N \cdot k_N \right)^2}$$

Частотні похідні по перемінних параметрах представляються у виді:

$$\frac{\partial U_{вих}}{\partial U_0} = 191.68 \cdot \frac{\varphi}{N}; \quad \frac{\partial U_{вих}}{\partial N} = -191.68 \cdot \frac{U_0 \cdot \varphi}{N^2}.$$

При куті повороту движка потенціометра $\varphi = 120^\circ = 2.094 \text{ рад}$ і середніх значень випадкових перемінні коефіцієнти впливи рівні:

$$\frac{\partial U_{вих}}{\partial U_0} = 191.68 \cdot \frac{2.094}{1104} = 0.3636,$$

$$\frac{\partial U_{вих}}{\partial N} = -191.68 \cdot \frac{24 \cdot 2.094}{1104^2} = 0.0079 \text{ В / виток}.$$

Припускаючи, що випадкові перемінні розподілено по нормальному законі, для якого $k=1$, одержуємо погрішність вихідної напруги:

$$\delta U_{вих} = \sqrt{(0.3636 \cdot 0.2)^2 + (0.0079 \cdot 2)^2} = 0.074 \text{ В},$$

$$\text{що складає } \frac{0.074}{24 \cdot 191.68 \cdot 2.094} \cdot 100\% = 0.85\% \quad \text{вихідної}$$
$$1104$$

напруги. Що нас цілком і влаштовує.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

4.4. Розробка технологічного процесу зборки

Проектування технологічного процесу зборки містить у собі вибір найбільш раціональних процесів і способів зборки, визначення послідовності з'єднання деталей і збиральних одиниць, регулювання і контролю виробу з призначенням устаткування, робочих і вимірювальних інструментів.

Розчленовування приладу на збиральні одиниці приводить до скорочення виробничого циклу його виготовлення за рахунок організації рівнобіжної зборки збиральних одиниць.

Проектування технологічного процесу зборки складається з наступних етапів [25]:

- на підставі аналізу конструкторської документації розробляється схема збирального складу і технологічна схема зборки;
- здійснюється вибір організаційної форми зборки з урахуванням конструктивних особливостей виробу, річної програми випуску, умов взаємозамінності й ін.;
- виробляється вибір методу зборки виходячи з вимог взаємозамінності і прийнятої організаційної форми зборки;
- вибирається устаткування робочих місць відповідно до призначення збиральних операцій;
- підбирається універсальна і проектується спеціальне оснащення;
- підбираються допоміжні матеріали;
- встановлюються режими роботи для кожної операції;
- виробляється нормування операцій [19].

4.5. Схема складального складу

На підставі аналізу конструкторської документації створюється схема складального складу. На рис. 4.1. представлена схема складального складу механізму передатного.

Побудова таких схем дає можливість визначити конструктивні і збиральні елементи приладу і їхній взаємозв'язок, а також представити проект технологічного процесу зборки.

Схема складального складу використовується для аналізу і синтезу механізму і процесу зборки.

Схему можна використовувати як диспетчерський документ, по якому зручно стежити за процесом виробництва виробу і вживати заходів,

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

якщо готовність тих чи інших елементів не відповідає графіку. У той же час схема збирального складу не дає представлення про послідовність зборки і способі забезпечення з'єднань.

4.6. Технологічна схема зборки

Послідовність зборки, способи забезпечення з'єднань, періодичність і зміст процесу регулювання, іспитів і контролю визначає технологічна схема зборки передатнього механізму.

Технологічна схема зборки, сприяючи аналізу конструкції механізму з технологічного боку, дозволяє змінювати конструкцію приладу, що спрощує технологічний процес.

Технологічна схема зборки, представляючи собою, наочне зображення збирального процесу, є основним документом, що фіксує технологічний процес зборки [19].

4.7. Маршрутний технологічний процес

Одним з основних моментів при проектуванні технологічного процесу є розробка маршруту зборки, що представляє собою перелік операцій у порядку їхнього виконання.

Маршрут зборки звичайно починається з підготовчої операції і надалі будується з урахуванням розбивки на збиральні одиниці.

Дані техпроцесу заносяться в технологічні карти, відомості завантаження устаткування, відомості норм витрати на основні і допоміжні матеріали і т.д.

Основним документом технологічного процесу є технологічна карта, у якій викладені зведення про структуру і зміст техпроцесу, поділ його на операції і переходи, про режими зборки, про послідовність монтажу, методах регулювання, способах контролю і т.д. Указівками, приведеними в технологічних картах, керуються при виготовленні деталей, під час збиральних і монтажних робіт, при регулюванні й іспитах [19].

В даний час на підприємствах в основному використовують маршрутні й операційні карти.

					<i>ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маршрутна карта встановлює послідовність проходження оброблюваного вузла чи деталі по цехах і містить опис всіх операцій вироблених над об'єктом. У ній указуються дані про основний матеріал і розміри заготовки, перелічують цехи і майстерні в який повинна проводитись обробка, дають перелік операцій, подають відомості про основне устаткування і технологічне оснащення, професії і розряди робітника, а також нормовані зведення [19].

Операційна карта розробляється окремо на кожну операцію. Вона містить крім перерахованих вище зведень повний перелік усіх переходів з докладним викладом даних про режими, методику технологічного контролю, геометричних і інших параметрах, вимірах і іспитах.

4.8. Опис конструкції і принципу роботи технологічного контрольного пристосування

Спроектоване пристосування призначене для контролю герметичності приладу методом реєстрації падіння тиску (манометричний метод).

У приладі створюється надлишковий тиск. Після припинення надуву тиску в приладі падає за рахунок перетекання повітря в зовнішнє середовище. Про герметичність приладу судять за часом, за яке тиск у приладі упаде до заданої величини.

Прилад, що перевіряється, встановлюється на спеціальну підставку 4 і ексцентриковим затиском 1 через шток притискається до гумової прокладки 8, завдяки чому щільно закривається вхідний отвір приладу, що перевіряється. Стиснене повітря від мережі високого тиску (компресор чи балон стиснутого повітря) через газовий вентиль 3 подається в бачок 2, потім вентиль перекривається і проводиться контроль герметичності.

Зробимо розрахунок ексцентрикового затиску. Ексцентриситет обчислюється по формулі :

$$e = \frac{S_1 + \delta + \frac{Q}{I}}{1 - \cos \alpha} ;$$

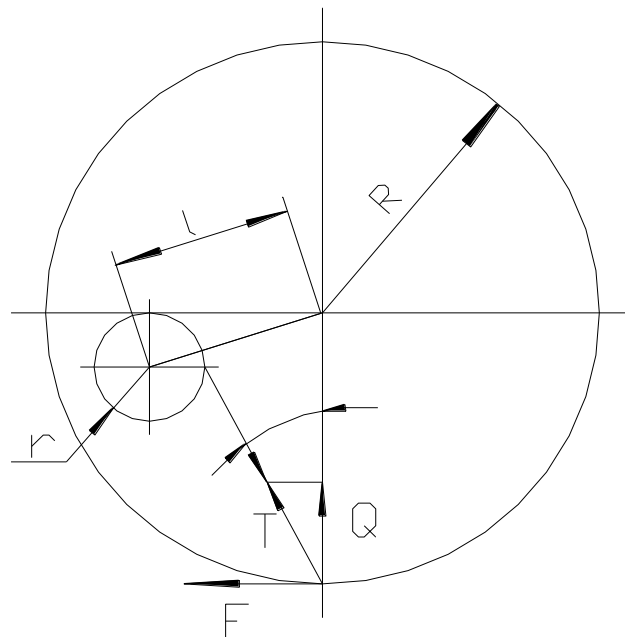
де S_1 – зазор, що забезпечує волю установки чи заготівлі приладу під ексцентрик;

Q – сила затиску приладу;

I – твердість затискного пристрою;

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

α - кут повороту ексцентрика.



Розрахуємо силу затиску. При тиску в мережі 3 атм. сила, що діє на прилад, буде дорівнювати :

$$F = S \cdot P = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P = \frac{\pi \cdot (78 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 3 \cdot 101.325 \cdot 10^3 = 1452.5 H$$

$$F_{\text{ексц}} = K_3 \cdot F = 1.5 \cdot 1452.5 = 2178.75 \text{ H} ,$$

Приймаємо $S_I = 0.6 \text{ мм}$, $\delta = 0.8 \text{ мм}$, $I = 12000 \text{ Н/мм}$, $\alpha = 70^\circ$
Тоді:

$$e = \frac{0.6 + 0.8 + 2178.75/12000}{1 - \cos 70^\circ} = 2.4 \text{ mm} .$$

Визначаємо радіус осі ексцентрика:

$$r = \sqrt{\frac{Q}{4 \cdot [\sigma_{см}]}} ,$$

де $[\sigma_{см}]$ - напруга, що допускається, на зминання. Для сталі Ст3
 $[\sigma_{см}] = 160 \text{ МПа}$, $Q = F_{\text{ексц}} = 2178.75 \text{ Н}$

$$r = \sqrt{\frac{2178.75}{4 \cdot 160 \cdot 10^6}} = 1.85 \text{ мм} .$$

З конструктивних розумінь приймаємо $r = 4 \text{ мм}$.

Радіус R ексцентрика обчислюється по формулі

$$R = \frac{e - f' \cdot r}{\sin \varphi} ,$$

де f' - коефіцієнт тертя, $f' = 0.05 \dots 0.15$

$\varphi = 6^\circ$

$$R = \frac{2.4 - 0.1 \cdot 4}{\sin 6^\circ} = 19.13 \approx 19 \text{ мм} .$$

Найбільший момент на рукоятці ексцентрика визначається по формулі

$$N \cdot l = [1 + \sin(180 - \alpha + \varphi)] \cdot e \cdot Q ,$$

де N – зусилля на рукоятці;

l – довжина рукоятки.

$$N \cdot l = [1 + \sin(180 - 70 + 6)] \cdot 2.4 \cdot 10^{-3} \cdot 2178.75 = 9.93 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При зусиллі на рукоятці 70 Н її довжина складе 142 мм

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Висновки

1. У ході виконання дипломного проекту бакалавра розроблено аерогравіметричний висотомір з наступними технічними характеристиками:

- похибка виміру висоти 1.4 м;
- імовірність безвідмовної роботи на 2000 годин 0.965;
- час заспокоєння рухливої системи 0.12 с;
- величина перерегулювання 0.1%;
- час запізнювання 0.005с.

2. Розглянуто особливості поєднання аерогравітаційного висотоміра з бортовою ПЕОМ і варіант обслуговування за пріоритетами. У якості персональної електронної обчислювальної машини було використовано IBM PC сумісний комп'ютер. Розглянуто один з можливих варіантів вводу вимірювальної інформації за допомогою так званої L – плати (продукція фірми L - CARD), найбільш сучасний варіант вводу до бортової ПЕОМ.

3. У додатках представлено специфікації складальних креслень.

Література

1. Андреева Л.Е., Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
2. Асс Б.А., Антипов Е.Ф., Жукова Н.М., Детали авиационных приборов. Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979 – 231 с.
3. Асс Б.А., Жукова Н.М., Детали и узлы авиационных приборов, и их расчет. - М.: Оборонгиз, 1960. – 385 с.
4. Безвесильная Е.Н., Старцев С.М. Применение измерителя линейных ускорений для повышения точности измерения ускорения силы тяжести. Сб. трудов МНТК "Перспективы развития приборостроения", Славское, 2001, с.32.-37.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П., Теория систем автоматического регулирования.– М.: Наука, 1972. – 768 с.
6. Боднер В.А., Авиационные приборы. - М.: Машиностроение, 1969, - 467 с.
7. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Ф.С., Авиационные приборы. – М.: Машиностроение, 1964. – 738 с.
8. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Ф.С., Авиационные приборы и автоматы. – М.: Машиностроение, 1978. – 427 с.
9. Браславский Д.А., Приборы и датчики летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1970. – 392 с.
10. Воробьев В.Г., Авиационные приборы и измерительные системы. – М.: машиностроение, 1981.- 195 с.
11. Джаин Д., AutoCAD. Программирование. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1992. – 336 с.
12. Доброленский Ю.П., Авиационное оборудование. – М.: Машиностроение, 1989. – 262 с.
13. Курсовое проектирование механизмов РЭС/ Под ред. Г.И. Рощина. – М.: Высш. школа, 1991.- 246 с.
14. Мельник Н.А., Богданюк В.Е., Корж Н.А. Методические указания по выполнению дипломного проекта для приборостроительных специальностей. – К.: КПИ, 1979.
15. Милосердин Ю.В., Семенов Е.Д., Кречко Ю.А., Расчет и конструирование механизмов приборов и установок. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985.- 408 с.
16. Нестерова Н.П., Коваленко А.П. и др., Элементы приборных устройств.: Курсовое проектирование. В 2-х частях / Под ред. О.Ф. Тищенко. – М. : Высш. Школа, 1978. – 328 с., ил.

- 17.Общетехнический справочник/Под ред. Е.А. Скороходова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1990. – 496 с., ил.
- 18.Организация и планирование приборостроительного производства. Управление предприятием/Под ред. Н.М. Лыча и А.Э. Розенплентера. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1986.–344 с.
- 19.Остафьев В.А., Вислоух С.П., Антонюк В.С., Методические указания по выполнению технологической части дипломного проекта. – К.: КПИ, 1984. – 48 с.
- 20.Анализ динамической точности высотомера АГС - Безвесильная и Бондаренко – «Актуальные научные достижения 2019» Education and Science s.r.o (Чехия, Прага)
07.06.2019, с.48-54
- 21.Первицкий Ю.Д., Расчет и конструирование точных механизмов. – изд. 2-е, доп. и переработ. Л: Машиностроение, 1976.
- 22.Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
- 23.Справочник конструктора точных приборов / Под ред. И. Я. Левина. – М.: Машиностроение, 1967.- 743 с.
- 24.Справочник по сопротивлению материалов / Под ред. С.П. Фесика. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1982.- 280 с.
- 25.Ткачук К.Н. и др., Приборостроение. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1980.- 192 с.

					ДП. ПІ 51.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

Додатки